

П.А. БЕХТА¹, Р.О. КОЗАК²

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ СУШІННЯ СОЛОМ'ЯНОЇ СТРУЖКИ У ЦИКЛОННО-СПІРАЛЬНІЙ СУШАРЦІ

Запропоновано структурну схему процесу сушіння солом'яної стружки у пневматичних циклонно-спіральних сушарках, яка охоплює комплекс параметрів, що визначають результат сушіння. Отримано математичну модель вартості енергетичних затрат на сушіння стружки у цих сушарках. На основі математичної моделі розраховано оптимальні розміри сушарки та режимні параметри для сушіння солом'яної стружки за різної початкової вологості стружки та потреби в ній. Встановлено, що в разі збільшення потреби в сухій стружці для мінімізації енергозатрат на сушіння, конструктивно необхідно збільшувати висоту сушарки, а не її діаметр. У разі зменшення початкової вологості стружки і незмінних конструктивних характеристик сушарки, потрібно знижувати температуру і швидкість газу на вході в сушарку, що збільшить час перебування стружки в сушарці за майже незмінної тривалості сушіння.

Ключові слова: солом'яна стружка, сушіння, циклонно-спіральна сушарка, оптимізаційна модель.

Постановка проблеми. За умов нестачі й постійного здорожчання енергетичних ресурсів важливого значення набуває розроблення методів зниження енерговитрат. Проектування сучасних систем управління складними технічними об'єктами базується передусім на використанні таких алгоритмів управління, які дають змогу мінімізувати затрати сировини і енергії на виробництві.

¹ **БЕХТА Павло Антонович** – дійсний член Лісівничої академії наук України, завідувач кафедри технології деревинних композиційних матеріалів, целюлози та паперу, доктор технічних наук, професор, Національний лісотехнічний університет України. м. Львів, Україна. Тел.: +38(032) 238-44-99. E-mail: bekhta@ukr.net

² **КОЗАК Руслан Олегович** – доцент кафедри технології деревинних композиційних матеріалів, целюлози та паперу, кандидат технічних наук, Національний лісотехнічний університет України. м. Львів, Україна. Тел.: +38(032) 238-44-99. E-mail: kozak_ruslan@ukr.net

Стружкові плити традиційно виготовляють з деревини. Однак світові запаси деревини стрімко знижуються, ціна на неї зростає, тому в багатьох країнах світу проводять інтенсивні дослідження щодо заміни деревинної сировини на іншу, зокрема рослинну сировину. За останні роки в багатьох країнах злакова солома стала головною недеревинною сировиною, яку використовують для виготовлення деревинних плит. У США, після багаси, злакову солому вважають другим найпридатнішим сільськогосподарським волокном для виготовлення деревинних композитів [1]. Однак з використанням у виробництві стружкових плит соломи, яка має властивості, відмінні від деревини, постає питання коректування технології їх виготовлення, зокрема дільниці сушіння солом'яної стружки.

Сушильна дільниця у виробництві стружкових плит за витратою теплової енергії є однією з найенергомісткіших [2, 3]. Витрата тепла на сушіння стружки в п'ять разів більша, ніж на пресування плит [3]. Отже, зниження енергозатрат на технологічний процес сушіння шляхом його математичного моделювання й оптимізації параметрів є актуальним завданням.

Для сушіння стружки розроблено велику кількість різних за конструкцією сушарок [3-5, 7]. Встановлено, що за питомими витратами тепла, електроенергії та напруженістю за випаруваною вологою циклонно-спіральні сушарки для сушіння солом'яної стружки є ефективнішими за інші [4]. Однак для якісного та енергоощадного сушіння солом'яної стружки у таких сушарках немає визначених й обґрунтованих як конструктивних параметрів сушарки, так і режимних параметрів сушіння. Тому отримання оптимальних конструктивних параметрів циклонно-спіральної сушарки і режимів сушіння у ній солом'яної стружки дасть змогу мінімізувати енергетичні затрати під час сушіння.

Виклад та результати дослідження. Одним з можливих шляхів інтенсифікації процесу сушіння у пневматичних циклонно-спіральних сушарках є його математичне моделювання та оптимізація параметрів матеріального та теплового балансу в синтезі з режимними параметрами сушіння та конструктивними параметрами сушарки.

Враховуючи, що на процес сушіння солом'яної стружки в спіральньо-циклонних сушарках впливає велика кількість факторів, які здебільшого взаємопов'язані, всі фактори були згруповані в окремі множини, внаслідок чого процес сушіння стружки в пневматичних циклонно-спіральних сушарках, загалом, може бути представлений структурною схемою, яку зображено на рис. 1.

Згідно з даними рис. 1, у процесі сушіння стружки результуючими є параметри матеріального та теплового балансу. Саме вони вказують на енергоощадність сушіння. Однак вплив на них чинять всі решту виділених параметрів, з яких керуванню піддаються параметри сушарки та агента сушіння на вході в неї. Отже, для здійснення енергоощадного якісного сушіння солом'яної стружки і керування процесом сушіння у пневматичних циклонно-спіральних сушарках, необхідно знайти такі оптимальні розміри сушарки та параметри агента сушіння на вході в сушарку, щоб забезпечити:

- мінімальні витрати тепла та електроенергії, які визначатимуть ефективність процесу сушіння;
- необхідну продуктивність сушарки для безперервності технологічного процесу виготовлення стружкових плит;
- задані параметри сухої стружки, що диктуються умовами подальшого використання стружки, і пожежобезпечністю процесу сушіння.

Враховуючи, що спільним параметром для енергетичних показників є вартість, то цільова функція оптимізації процесу сушіння стружки в пневматичних циклонно-спіральних сушарках може бути записана у вигляді:

$$B_{\Delta W} = B_N + B_Q \Rightarrow \min \quad (1)$$

за таких технологічних обмежень:

$$G_{W_k} = [G_{W_k}]; \quad (2)$$

$$[W_{k, \min}] \leq W_k \leq [W_{k, \max}]; \quad (3)$$

$$[t_{M, k, \min}] \leq t_{M, k} \leq [t_{M, k, \max}]; \quad (4)$$

$$\rho_z \cdot v_z \geq [\rho_z \cdot v_z], \quad (5)$$



Рис. 1. Структурна схема процесу сушіння стружки у пневматичних циклонно-спіральних сушарках

де $B_{\Delta W}$ – вартість енергетичних затрат на сушіння стружки від початкової до кінцевої вологості, грн;

B_Q – вартість тепла, витраченого на сушіння стружки, грн;

B_N – вартість електроенергії, витраченої на сушіння стружки, грн;

G_{W_k} і $[G_{W_k}]$ – продуктивність сушарки за сухим матеріалом розрахункова і необхідна відповідно, кг/год;

W_k і $[W_k]$ – вологість сухого матеріалу розрахункова і необхідна відповідно, %;

$t_{m.k}$ і $[t_{m.k}]$ – температура матеріалу на виході зі сушарки розрахункова і нормована вимогами пожежобезпечності процесу сушіння відповідно, %;

$\rho_z v_z$ і $[\rho_z v_z]$ – масова швидкість агента сушіння розрахункова і нормована умовами існування псевдорозрідження та виносу частинок з сушарки, кг/(м²·с).

Вартість електроенергії, витраченої на сушіння стружки, визначають за формулою

$$B_N = N_{суш.} \cdot C_N, \quad (6)$$

де $N_{суш.}$ – витрати електроенергії на сушіння стружки від початкової до кінцевої вологості, кВт/год;

C_N – вартість одного кВт електроенергії, грн/кВт.

Вартість тепла, витраченого на сушіння стружки, визначають за формулою

$$B_Q = Q \cdot C_Q, \quad (7)$$

де Q – витрати тепла на сушіння стружки від початкової до кінцевої вологості, кДж/год;

C_Q – вартість одного кДж тепла, грн/кДж.

Вартість одного кДж тепла визначають за формулою

$$C_Q = \frac{C_n}{Q_B^P \cdot \eta_m}, \quad (8)$$

де Q_B^P – вища теплотворна здатність палива, кДж/кг;

η_m – ККД топки;

C_n – ціна 1 кг палива, грн/кг.

Методику розрахунку параметрів сушіння у пневматичній спіральньо-циклонній сушарці наведено в літературі [5].

Витрати електроенергії (кВт) на сушіння стружки дорівнюють:

$$N_{\text{суш.}} = \frac{V_{\text{вент}} \cdot H_{\text{вент}}}{3600 \cdot \eta_{\text{вент}} \cdot 1000}, \quad (9)$$

де $V_{\text{вент}}$ – продуктивність вентилятора, м³/год;

$H_{\text{вент}}$ – приведений до густини повітря напір, що розвиває вентилятор, Н/м²;

$\eta_{\text{вент}}$ – ККД двигуна вентилятора.

Продуктивність вентилятора визначають за формулою

$$V_{\text{вент}} = \frac{L}{\rho_{\text{з.вих}}}, \quad (10)$$

де L – витрата теплоносія, кг/год;

$\rho_{\text{з.вих}}$ – густина агента сушіння на виході з сушарки, кг/м³.

Витрата теплоносія визначають за формулою

$$L = F_{\text{суш}} \cdot \rho_{\text{з}} \cdot v_{\text{з}}, \quad (11)$$

де $\rho_{\text{з}} \cdot v_{\text{з}}$ – масова швидкість агента сушіння, кг/(м² с);

$F_{\text{суш}}$ – площа поперечного перерізу сушарки, м².

Приведений до густини повітря напір, що розвиває вентилятор, дорівнює:

$$H_{\text{вент}} = \sum_{i=1}^n \frac{1,2}{\rho_{\text{з}i}} \cdot H_{\text{ст}i} = \sum_{i=1}^n \frac{1,2}{\rho_{\text{з}i}} \cdot \frac{\rho_{\text{з}i} \cdot v_{\text{з}i}^2 \cdot \zeta_i}{2} = \sum_{i=1}^n 0,6 \cdot v_{\text{з}i}^2 \cdot \zeta_i, \quad (12)$$

де $H_{\text{ст}i}$ – статичний напір вентилятора на i -тій ділянці, Н/м²;

$\rho_{\text{з}i}$ – густина агента сушіння на i -тій ділянці, кг/м³;

$v_{\text{з}i}$ – швидкість агента сушіння на i -тій ділянці, м/с;

ζ_i – коефіцієнт місцевого опору [5].

Швидкість агента сушіння (м/с) на i -тій ділянці сушіння стружки визначають за формулою

$$v_{\text{з}i} = \frac{L}{\rho_{\text{з}i} \cdot F_{\text{суш}} \cdot 3600}. \quad (13)$$

Густина агента сушіння на i -тій ділянці сушіння стружки, згідно з табличними даними [5], може бути записана у вигляді:

$$\rho_{zi} = 105,9444 \cdot 10^{-2} - 210,0589 \cdot 10^{-5} \cdot t_i + 208,3333 \cdot 10^{-8} \cdot t_i^2 - 774,4108 \cdot 10^{-12} \cdot t_i^3, \quad (14)$$

де t_i – температура агента сушіння на i -тій ділянці сушіння стружки, °C.

Витрати тепла на сушіння стружки від початкової до кінцевої вологості дорівнюють:

$$Q = Q_{\text{вип}} + Q_{\text{м}} + Q_{\text{огор}} + Q_{\text{відн.г}}; \quad (15)$$

$$Q_{\text{вип}} = M_{\text{вип}} \cdot (2480 + 1,85 \cdot t_{\text{г.вих}}); \quad (16)$$

$$Q_{\text{м}} = G_{W_{\kappa}} \cdot c_{\text{м}} \cdot (t_{\text{м.к}} - t_{\text{н.с.}}); \quad (17)$$

$$Q_{\text{огор}} = 3,6 \cdot 1,1 \cdot K_{\text{огор}} \cdot (t_{\text{г.с}} - t_{\text{н.с.}}) \cdot F_{\text{огор}}; \quad (18)$$

$$Q_{\text{відн.г}} = L \cdot c_{\text{г.вих}} \cdot (t_{\text{г.вих}} - t_{\text{н.с.}}), \quad (19)$$

де $Q_{\text{вип}}$ – витрата тепла на випаровування води, кДж/год;

$Q_{\text{м}}$ – втрата тепла з висушеним матеріалом, кДж/год;

$Q_{\text{втр}}$ – втрата тепла через огороження сушарки, кДж/год;

$Q_{\text{відн.г}}$ – втрата тепла з відпрацьованим агентом сушіння, кДж/год;

$M_{\text{вип}}$ – маса води, яка випаровується з матеріалу, кг води/год;

$t_{\text{г.вих}}$ – температура відпрацьованих газів, °C;

$c_{\text{м}}$ – теплоємність матеріалу, кДж/(кг·°C);

$c_{\text{г.вих}}$ – теплоємність газів на виході з сушарки, кДж/(кг·°C);

L – витрата теплоносія, кг/год;

$t_{\text{н.с.}}$ – температура навколишнього середовища, °C;

$K_{\text{огор}}$ – коефіцієнт теплопередачі через огороження, Вт/(м²·°C);

$t_{\text{г.с}}$ – середня температура у сушарці, °C;

$F_{\text{огор}}$ – площа поверхні огорожень, м²;

$$F_{\text{огор}} = \pi \cdot D_{\text{зовн}} \cdot H + \frac{2 \cdot \pi \cdot D_{\text{зовн}}^2}{4}, \quad (20)$$

де $D_{\text{зовн}}$ – зовнішній діаметр сушарки, м;

H – висота сушарки, м.

Маса води, яка випаровується з матеріалу в кг води за годину, становить:

$$M_{\text{вип}} = G_{W_{\kappa}} \cdot \frac{W_{\text{поч}} - W_{\kappa}}{100 + W_{\kappa}}, \quad (21)$$

де G_{W_k} – продуктивність сушарки за сухим матеріалом, кг/год.;

W_{noch} – початкова вологість стружки, %;

W_k – вологість сухої стружки, %.

Вологість сухої стружки у % визначають за формулою

$$W_k = \frac{W_{noch}}{E + 1}, \quad (22)$$

де E – симплекс вологовмісту, який визначають з рівняння кінетики процесу сушіння у циклонно-спіральної сушарці [5]:

$$E = \left(\frac{G_{W_k}}{10^4 \cdot K_o^{-0,953} \cdot Ar^{-0,382} \cdot \Theta^{-0,228} \cdot L^{0,725} \cdot (V_{суш} \cdot \rho_{нас} \cdot \psi)^{0,275} \cdot (d_e / R_{cp})^{0,85} \cdot (4 \cdot a / d_e^2)^{0,275}} \right)^{\left(\frac{1}{-0,765} \right)}, \quad (23)$$

де G_{W_k} – продуктивність сушарки за сухим матеріалом, кг/с;

K_o – критерій Косовича;

Ar – критерій Архімеда;

Θ – симплекс температур;

L – витрата теплоносія, кг/с;

$V_{суш}$ – об'єм сушарки, м³;

$\rho_{нас}$ – насипна щільність матеріалу, кг/м³;

ψ – коефіцієнт заповнення спіралі;

d_e – еквівалентний діаметр частинки, м;

R_{cp} – середній радіус заокруглення спіралі, м;

a – коефіцієнт температуропровідності матеріалу, м²/с.

Критерій Косовича дорівнює:

$$K_o = \frac{r \cdot W_{noch}}{100 \cdot (c_m \cdot t_{2.вх})}, \quad (24)$$

де r – теплота пароутворення, кДж/кг;

W_{noch} – початкова вологість стружки, %;

c_m – теплоємність стружки, кДж/(кг·°С);

$t_{2.вх}$ – температура агента сушіння на вході в спірально-циклонну сушарку, °С.

Критерій Архімеда визначають за формулою

$$Ar = \frac{d_e^3 \cdot \rho_m \cdot \rho_g \cdot g}{\mu^2}, \quad (25)$$

де d_e – еквівалентний діаметр частинки, м;

ρ_m – щільність матеріалу на вході в сушарку, кг/м³;

ρ_g – густина газу за температури теплоносія на вході в сушарку, кг/м³;

g – прискорення вільного падіння, м/с²;

μ – динамічний коефіцієнт в'язкості на вході в сушарку, кг/(м·с).

Симплекс температур дорівнює:

$$\Theta = \frac{t_{m.вих} - t_{н.с.}}{t_{г.вх} - t_{m.вих}}, \quad (26)$$

де $t_{m.вих}$ – температура матеріалу на виході з сушарки, °С;

$t_{н.с.}$ – температура навколишнього середовища, °С;

$t_{г.вх}$ – температура агента сушіння на вході у спіраль-но-циклонну сушарку, °С.

Коефіцієнт заповнення спіралі визначають за формулою

$$\psi = \frac{G_{w_k} \cdot \tau}{3600 \cdot \rho_{w_k} \cdot V_{суш}}, \quad (27)$$

де τ – час сушіння, с;

ρ_{w_k} – щільність сухого матеріалу, кг/м³.

Час сушіння матеріалу визначають за формулою [7]:

$$\tau = \frac{3600 \cdot Q'}{\alpha \cdot F_m \cdot \Delta t}, \quad (28)$$

де Q' – кількість тепла, що передається від агента сушіння матеріалу, кДж;

α – коефіцієнт тепловіддачі від газу до висушуваного матеріалу, Вт/(м² °С);

F_m – розрахункова поверхня матеріалу, що подається в сушарку, м²;

Δt – середня логарифмічна різниця температур між газом і висушуваним матеріалом, °С.

Коефіцієнт тепловіддачі від газу до висушуваного матеріалу дорівнює:

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda}{d_e}, \quad (29)$$

де Nu – критерій Нусельта, який дорівнює [6]:

$$Nu = 0,87 \cdot Ar^{0,24}, \quad (30)$$

λ – коефіцієнт теплопровідності газу, Вт/(м °С)

$$\Delta t = \frac{t_{г.вх} - t_{г.вих}}{2,3 \cdot \lg \left(\frac{t_{г.вх} - t_{м.вих}}{t_{г.вих} - t_{м.вих}} \right)}, \quad (31)$$

де $t_{г.вх}$ – температура газу на вході в сушарку, °С;

$t_{г.вих}$ – температура газу на виході зі сушарки, °С;

$t_{м.вих}$ – температура матеріалу на виході зі сушарки, °С;

$t_{м.вх}$ – температура матеріалу на вході в сушарку, °С.

Температуру газу на виході з сушарки визначають з балансового рівняння [5]:

$$t_{г.вих} = \frac{3600 \cdot L \cdot c_{г.вх} \cdot t_{г.вх} - Q}{3600 \cdot L \cdot c_{г.вих}}, \quad (32)$$

де $c_{г.вх}$ – теплоємність газів на вході в сушарку, кДж/(кг·°С);

$c_{г.вих}$ – теплоємність газів на виході з сушарки, кДж/(кг·°С).

Розв'язок рівняння (32) здійснюють методом найменших квадратів. Задаючись початковим значенням температури газу на виході з сушарки і визначаючи витрати тепла на сушіння стружки за рівнянням (15) методом Ньютона стандартної процедури пошуку рішень програми Microsoft Excel, встановлюють мінімальний квадрат різниці між прийнятим значенням температури газу на виході зі сушарки і розрахованим значенням за рівнянням (32).

Враховуючи формули (6)-(32), модель вартості енергетичних затрат на сушіння стружки від початкової до кінцевої вологості (1) набуде такого вигляду:

$$B_{\Delta W} = \frac{C_N \cdot b \cdot h \cdot v_{г.вих} \cdot \sum_{i=1}^n 0,6 \cdot v_{г.и}^2 \cdot \zeta_i}{3,6 \cdot 10^6 \cdot \eta_{вент}} + \frac{C_n}{Q_B^P \cdot \eta_m} \cdot \left[\frac{G_{W_k} \cdot W_{поч} \cdot E \cdot (2480 + 1,85 \cdot t_{г.вих})}{W_{поч} + 100 \cdot (1 + E)} + \right. \\ \left. + G_{W_k} \cdot c_m \cdot (t_{м.к} - t_{н.с.}) + 17,82 \cdot \pi \cdot b \cdot K_{озор} \cdot (0,5 \cdot (t_{г.вх} + t_{г.вих}) - t_{н.с.}) \cdot (H + 2,25 \cdot b) + \right. \\ \left. + b \cdot h \cdot \rho_{г.} \cdot v_{г.} \cdot c_{г.вих} \cdot (t_{г.вих} - t_{н.с.}) \right] \Rightarrow \min, \quad (33)$$

де b, h, l – відповідно ширина, висота і довжина труби-сушарки, м.

$$E = \left(\frac{G_{W_e}}{10^4 \cdot (b \cdot h \cdot \rho_{\tilde{a}} \cdot v_{\tilde{a}})^{0,725} \cdot (d_e / (1,75 \cdot b))^{0,85} \cdot (4 \cdot a / d_e^2)^{0,275}} \times \right. \\ \times \frac{1}{\left(\frac{r \cdot W_{\tilde{w}^+}}{100 \cdot (c_i \cdot t_{\tilde{a}\tilde{a}\tilde{o}})} \right)^{-0,953} \cdot \left(\frac{d_e^3 \cdot \rho_i \cdot \rho_{\tilde{a}} \cdot g}{\mu^2} \right)^{-0,382} \cdot \left(\frac{t_{i,\tilde{a}\tilde{o}\tilde{o}} - t_0}{t_{\tilde{a}\tilde{o}\tilde{o}} - t_{i,\tilde{a}\tilde{o}\tilde{o}}} \right)^{-0,228}} \times \\ \left. \times \frac{1}{\left(\frac{2,3 \cdot G_{W_e} \cdot \rho_{i\tilde{a}\tilde{n}} \cdot \tilde{n}_i \cdot (t_{i,\tilde{e}} - t_{i,\tilde{n}}) \cdot d_e^2}{5,22 \cdot (t_{\tilde{a}\tilde{o}\tilde{o}} - t_{\tilde{a}\tilde{e}\tilde{o}\tilde{o}}) \cdot \alpha \cdot \lambda} \cdot \frac{\lg \left(\frac{t_{\tilde{a}\tilde{o}\tilde{o}} - t_{i,\tilde{a}\tilde{e}\tilde{o}\tilde{o}}}{t_{\tilde{a}\tilde{e}\tilde{o}\tilde{o}} - t_{i,\tilde{a}\tilde{e}\tilde{o}\tilde{o}}} \right)}{\left(\frac{d_e^3 \cdot \rho_i \cdot \rho_{\tilde{a}} \cdot g}{\mu^2} \right)^{0,24}} \right)^{0,275}} \right)^{1/(-0,765)} \quad (34)$$

Виведена математична модель (33) реалізовує запропоновану структурну схему сушіння солом'яної стружки в циклонно-спіральній сушарці (рис. 1) й дає змогу визначити оптимальні параметри сушарки і режиму сушіння в ній за мінімальних енергетичних затрат.

Для отримання мінімальних значень моделі (33) розроблено програмне забезпечення на базі Microsoft Excel та Visual Basic, яке дозволяє з урахуванням технологічних обмежень (2)-(5) методом рівномірного пошуку здійснювати вибір оптимальних розмірних характеристик циклонно-спіральної сушарки та режимних параметрів процесу сушіння солом'яної стружки в ній за мінімальних енерговитрат.

Реалізувавши розроблений алгоритм при обмеженнях:

$$1 \leq W_{\kappa} \leq 3; \quad (35)$$

$$110 \leq t_{m,\kappa} \leq 140; \quad (36)$$

$$\rho_e \cdot v_e \geq 24; \quad (37)$$

в діапазоні змінних факторів:

$$2000 \leq G_{W_0} \leq 10000; \quad (38)$$

$$20 \leq W_{\text{поч}} \leq 80; \quad (39)$$

$$160 \leq t_{\text{з.вх}} \leq 800; \quad (40)$$

$$20 \leq v_{\text{з.вх}} \leq 100; \quad (41)$$

$$0,1 \leq b \leq 1,0; \quad (42)$$

$$0,1 \leq h \leq 1,0; \quad (43)$$

$$10 \leq l \leq 200 \quad (44)$$

отримано оптимальні розміри сушарки для різної потреби в солом'яній стружці за максимально можливої її початкової вологості, які наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Оптимальні розміри спірально-циклонної сушарки

Потреба в абс. сухій стружці, кг/год.	Розміри труби, м			Зовнішній діаметр сушарки, м	Діаметр циклона, м	Кількість витків спіралі	Висота сушарки, м
	<i>b</i>	<i>h</i>	<i>l</i>				
10000	0,54	0,95	137,00	2,43	1,35	23,1	21,93
7000	0,54	0,66	137,00	2,43	1,35	23,1	15,24
5000	0,54	0,47	137,00	2,43	1,35	23,1	10,85
2000	0,54	0,19	137,00	2,43	1,35	23,1	4,39

Примітка. Початкова вологість солом'яної стружки – 80%; кінцева вологість солом'яної стружки – 2%; температура солом'яної стружки на виході з сушарки – 110°C; масова швидкість агента сушіння 24 кг/(м² с).

Згідно з даними табл. 1, ширина і довжина труби сушарки і, як наслідок, діаметр та кількість витків сушарки не залежать від кількості стружки, яку необхідно висушити за одиницю часу. Зміна потреби в стружці за мінімальних енергозатрат впливає на висоту труби і в загальному на висоту сушарки. Це можна пояснити втратами теплоти в навколишнє середовище через огороження сушарки, на які більше впливає діаметр сушарки, ніж її висота. Витрати електроенергії в разі збільшення висоти сушарки дещо збільшуються, однак це зростання є незначним порівняно з економією тепла.

Для отриманих оптимальних розмірів циклонно-спіральної сушарки за відомої потреби у стружці та початкової її вологості визначено оптимальні параметри технологічного процесу: температура і швидкість агента сушіння на

вході у сушарку, температура і швидкість агента сушіння на виході зі сушарки, середня швидкість матеріалу в сушарці, час сушіння стружки і час перебування її в сушарці, які наведено в табл. 2.

Таблиця 2

Оптимальні параметри технологічного процесу сушіння солом'яної стружки у циклонно-спіральній сушарці

Потреба в абс. сухій солом'яній стружці, кг/год.	Початкова вологість солом'яної стружки, %	Температура газу на вході в сушарку, °C	Швидкість газу на вході в сушарку, м/с	Температура газу на виході зі сушарки, °C	Швидкість газу на виході зі сушарки, м/с	Середня швидкість стружки у сушарці, м/с	Час сушіння, с	Час перебування стружки у трубній сушарці, с	Вартість енергетичних затрат на сушіння стружки, грн
10000	80	796	75,9	110	28,2	20,1	6,8	6,8	4478,00
	70	696	69,5	100	27,6	18,2	5,7	7,5	3842,95
	60	597	62,7	91	27,1	16,4	5,7	8,4	3236,91
	50	496	55,2	81	26,6	14,6	5,6	9,4	2642,14
	40	391	47,1	69	26,0	12,8	5,5	10,7	2043,44
	30	273	38,4	52	25,1	10,9	5,4	12,6	1404,10
	20	160	31,1	35	24,3	9,3	5,1	14,8	823,14
7000	80	798	76,3	110	28,3	20,2	6,8	6,8	3130,97
	70	697	69,6	100	27,6	18,2	5,7	7,5	2675,91
	60	598	62,8	91	27,1	16,4	5,7	8,4	2254,10
	50	498	55,3	80	26,6	14,6	5,6	9,4	1839,77
	40	391	47,2	68	26,0	12,8	5,5	10,7	1420,13
	30	273	38,5	52	25,2	10,9	5,4	12,5	979,18
	20	161	31,1	35	24,3	9,3	5,1	14,8	574,70
5000	80	800	76,4	110	28,3	20,3	6,8	6,8	2237,22
	70	698	69,6	100	27,6	18,2	5,7	7,5	1908,97
	60	599	62,8	90	27,1	16,4	5,6	8,4	1605,70
	50	498	55,3	80	26,6	14,6	5,6	9,4	1312,64
	40	392	47,2	68	26,0	12,8	5,5	10,7	1014,57
	30	274	38,5	52	25,2	10,9	5,4	12,5	697,31
	20	161	31,2	35	24,4	9,3	5,1	14,7	411,21
2000	80	795	76	110	28,3	20,1	6,8	6,8	894,45
	70	695	69,5	100	27,7	18,2	5,7	7,5	766,56
	60	597	62,7	91	27,1	16,4	5,7	8,4	648,44
	50	496	55,2	81	26,6	14,6	5,6	9,4	525,90
	40	390	47,1	69	26,0	12,8	5,5	10,7	405,70
	30	273	38,4	52	25,1	10,9	5,4	12,6	278,21
	20	159	31,3	35	24,5	9,4	5,2	14,6	163,84

Примітка. Кінцева вологість солом'яної стружки – 2%; масова швидкість агента сушіння 24 кг/(м² с), розміри сушарки відповідають табл. 1 для відповідної потреби в абс. сух. стружці.

Встановлено (див. табл. 2), що під час висушування солом'яної стружки з мінімальними енергетичними затратами температура і швидкість газу на вході у сушарку зменшуються із зменшенням початкової вологості стружки, що зумовлює збільшення часу перебування стружки у сушарці за майже незмінної тривалості сушіння.

Енергетичні затрати на сушіння солом'яної стружки зменшуються зі зменшенням початкової вологості солом'яної стружки та потреби у стружці.

Висновки. На основі створеної математичної моделі визначено конструктивні й технологічні режимні параметри процесу сушіння солом'яної стружки, що дає змогу підвищити техніко-економічну ефективність технології виготовлення стружкових плит із використанням соломи. Крім цього, отримані математична модель та її результати можуть бути використані у створенні нових конструкцій циклонно-спіральних сушарок.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. **Rowell R.M.** Paper and Composites from Agro-Based Resources / R. M. Rowell, R. A. Young, J. K. Rowell. – Boca Raton, New York, Tokyo : CRC Lewis Publishers, 1997. – 464 p.

2. **Янюк Ю.В.** Математическое моделирование и оптимизация процессов сушки сыпучих материалов в сушильной установке барабанного типа : дис. канд. техн. наук : 05.13.18 / Янюк Юлия Вячеславовна. – Петрозаводск, 2003. – 164 с.

3. **Бехта П.А.** Технологія і обладнання для виробництва деревинно-стружкових плит : навч. посіб. [для студ. вищ. навч. закл.] / Бехта П. А. – К. : ІСДО, 1994. – 456 с.

4. Козак Р.О. Визначення способу сушіння солом'яної стружки для виробництва стружкових плит / Р.О. Козак // Ліс. госп-во, ліс., папер. і деревооброб. пром-сть : міжвідом. наук.-тех. зб. – 2013. – № 39.1. – С. 68-71.

5. Стерлин Д.М. Сушка в производстве фанеры и древесностружечных плит [2-е изд., перераб. и доп.] / Стерлин Д. М. – М. : Лесн. пром-сть, 1977. – 384 с.

6. Михеев М.А. Основы теплопередачи : моногр. [2-е изд., стереотип.] / М.А. Михеев, И.М. Михеева. – М. : Энергия, 1977. – 344 с.

7. Лебедев П.Д. Расчет и проектирование сушильных установок : учебн. [для высш. техн. учеб. заведений] / Лебедев П.Д. – М.-Л. : Госэнергоиздат, 1962. – 320 с.

П.А. Бэхта, Р.О. Козак

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА СУШКИ СОЛОМЕННОЙ СТРУЖКИ В ЦИКЛОННО- СПИРАЛЬНОЙ СУШИЛКЕ

Предложена структурная схема процесса сушки соломенной стружки в пневматических циклонно-спиральных сушилках, которая включает в себя комплекс параметров, определяющих результат сушки. Получена математическая модель стоимости энергетических затрат на сушку стружки в этих сушилках. На основе математической модели рассчитаны оптимальные размеры сушилки и режимные параметры для сушки соломенной стружки с различной начальной влажностью и потребностью в ней. Установлено, что при увеличении потребности в сухой стружке для минимизации энергозатрат на сушку, конструктивно необходимо увеличивать высоту сушилки, а не ее диаметр. При уменьшении начальной влажности стружки и неизменных конструктивных характеристиках сушилки необходимо уменьшать температуру и скорость газа на входе в сушилку, что увеличит время пребывания стружки в сушилке при почти неизменной продолжительности сушки.

Ключевые слова: соломенная стружка, сушка, циклонно-спиральная сушилка, оптимизационная модель.

P.A. Bekhta, R.O. Kozak

MATHEMATICAL MODELING AND OPTIMIZATION OF THE DRYING PROCESS OF STRAW PARTICLE IN CYCLONE-SPIRAL DRYER

A block diagram of drying straw particle in pneumatic cyclone spiral dryer that includes a set of parameters that determine the outcome of drying was introduced. A mathematical model of the energy costs for drying particle in these dryers was developed. The optimal sizes of the cyclone-spiral dryer and regimes of drying straw particles at the different initial moisture content of particles and necessity of it were calculated based on the proposed mathematical model. It was found that at increase of the demand of dry particles to minimize the energy consumption for drying, is necessary to increase the height of the dryer, but not its diameter. At decrease of initial moisture content particles and constant construction of the dryer is necessary to reduce the temperature and velocity of the gas at the inlet of the dryer, which will increase the residence time of particles in the dryer at almost constant duration of drying.

Key words: straw particles, drying, cyclone-spiral dryer, optimization model