

УДК 631.365:631.53.01:633.2

Л.Ю. Кокалюк, асп., І.М. Дударев, канд. техн. наук, Р.В. Кірчук, канд. техн. наук
Луцький національний технічний університет

Дослідження аеродинамічних характеристик шару вороху насіння трав

У статті досліджено структурні та аеродинамічні характеристики вороху насіння трав. Запропонована методика визначення структурних характеристик шару вороху. Представлені результати теоретичних та експериментальних досліджень зміни швидкості повітряного потоку від висоти шару вороху з врахуванням його структурних характеристик.
сушіння вороху насіння трав, швидкість повітряного потоку, об'ємна пористість, вологість

У даний час більшість сушарок, що використовуються в господарствах для сушіння сільськогосподарських рослинних матеріалів, як фізично, так і морально застарілі. Вони не дозволяють забезпечити оптимальні режими сушіння, внаслідок чого зростає енергоємність процесу та знижується його продуктивність. Крім того, недотримання режимів сушіння призводить до погіршення якісних показників матеріалу. В результаті аналізу функціонування конструкційно різних засобів сушіння сипких та малосипких матеріалів виявлено, що необхідно конструкційно передбачити і в практичних умовах забезпечити збалансованість основних складових технологічного процесу, що пов'язані з взаємодією матеріалу з тепловою енергією. Таким чином, важливо, щоб нові сушильні засоби відповідали наступним вимогам: низька енергоємність процесу сушіння, висока продуктивність, забезпечення збереження якісних показників матеріалу, спрощення конструкції та зниження її металоємності, повна автоматизація технологічного процесу. У сільськогосподарських підприємствах України найбільш поширені барабанні, напільні, карусельні та конвеєрні сушарки, а також бункери активного вентилявання. Зазначені сушарки мають істотні конструктивні недоліки, що перешкоджають інтенсифікації процесу сушіння. Режими сушіння насіння, які в них реалізуються, проходять за температури сушильного агента 120...130°C, що не забезпечує збереження поживних речовин та інших якісних показників. Сушіння здійснюється без урахування неоднорідності (за вологістю та масою) насіння, що складається з легких, середніх і важких фракцій. В результаті вологість фактично 30% насіння не відповідає кондиційному значенню. Тому дослідження процесу сушіння вороху насіння трав, спрямовані на вирішення проблеми енергозбереження, мають велике наукове і практичне значення. У зв'язку з цим постає актуальна проблема розробки технології і обґрунтування параметрів сушарки, що забезпечують необхідну якість сушіння насіння, енергозбереження, дозволяють максимально підвищити ефективність та продуктивність процесу сушіння.

Розглянемо процес проходження сушильного агента (далі СА) в сушарці [1] через шар матеріалу нескінченно малої ширини dx загальною висотою H вздовж вертикальної осі y знизу вгору. Загальна висота шару матеріалу складається з суми висот шарів, що розміщені на витках спіралеподібної перфорованої поверхні вздовж осі y , тобто:

$$H = h_1 + h_2 + \dots + h_n, \quad (1)$$

де h_1, h_2, \dots, h_n – висота n -го шару матеріалу вздовж вертикальної осі y (рис.1).

Для подальшого дослідження приймаємо наступні припущення: СА рухається через розглядуваний шар матеріалу знизу вгору вздовж осі y ; розглядається встановлений процес сушіння; матеріал повністю заповнює простір між витками спіралеподібної перфорованої поверхні вздовж осі y ; в межах висоти кожного n -го шару матеріал рівномірно розподілений та має однакові властивості, параметри та склад; втратами напору СА під час проходження через спіралеподібну перфоровану поверхню нехтуємо.

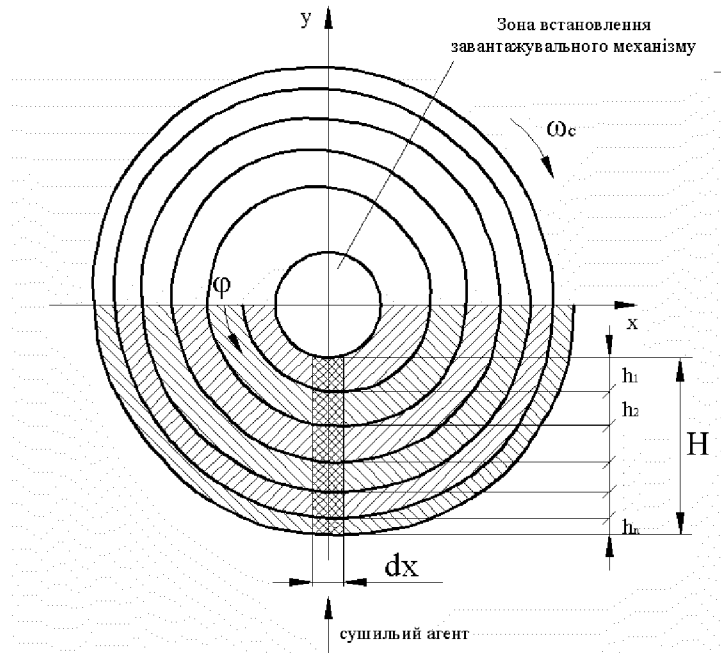


Рисунок 1 - Розрахункова схема процесу вентиляції матеріалу в сушарці

Кутова швидкість обертання спіралеподібної перфорованої поверхні ω_c залежить від тривалості сушіння матеріалу τ_c , початкових параметрів матеріалу та СА, а також загальної висоти шару H . Встановивши загальний час сушіння матеріалу τ_c та обґрунтувавши конструктивно найбільший кут спіралі ϕ_k , кутову швидкість обертання спіралеподібної перфорованої поверхні можна визначити наступним чином:

$$\omega_c = \frac{\phi_k}{\tau_c}, \quad (2)$$

де τ_c – загальний час сушіння, с;

ϕ_k – найбільший кут спіралі, рад.

Кількість шарів матеріалу n , з яких складається шар матеріалу висотою H , визначається кількістю повних витків спіралі, тобто:

$$n_c = \frac{\Phi_k}{2\pi}. \quad (3)$$

Отримане значення заокруглюється до найближчого меншого цілого числа.

За час сушіння τ_c матеріал переміщується поверхнею в межах кута її скручування (кут спіралі) від $\varphi = 0$ до $\varphi = \varphi_k$. У загальному випадку висоту кожного з шарів залежно від кута за яким скручена спіралеподібна поверхня можна визначити:

$$h_n(\varphi) = r(\varphi) - r(\varphi - 2\pi), \quad (4)$$

де φ – кут спіралі до місця розміщення розглядуваного шару матеріалу (основи шару), який можна записати таким чином $\varphi = \omega_c \tau$ (де τ – час сушіння);

$r(\varphi)$, $r(\varphi - 2\pi)$ – відповідно радіуси спіралі в полярних координатах з кутом спіралі φ та $\varphi - 2\pi$.

Радіуси спіралі $r(\varphi)$ та $r(\varphi - 2\pi)$ визначаються за рівнянням спіралі за якою скручена спіралеподібна перфорована поверхня [2]:

$$r(\varphi) = r_0 + t\varphi - Kr_0 e^{m\varphi}, \quad (5)$$

де r_0 – найменший радіус витка спіралі, м;

m , t – коефіцієнти, що залежать від найбільшого радіуса витка спіралі r_k та відповідного йому кута φ_k ;

K – конструктивний коефіцієнт.

Враховуючи залежність (4), висоту для кожного з шарів, що в момент часу сушіння τ знаходяться вздовж вертикальної осі y та утворюють шар загальною висотою H , можна записати:

$$\left\{ \begin{aligned} h_1 &= r(\omega_c \tau) - r(\omega_c \tau - 2\pi); \\ h_2 &= r(\omega_c \tau + 2\pi) - r(\omega_c \tau); \\ h_3 &= r(\omega_c \tau + 4\pi) - r(\omega_c \tau + 2\pi); \\ &\dots \\ h_n &= r(\omega_c \tau + 2\pi(n-1)) - r(\omega_c \tau + 2\pi(n-2)); \\ H &= \sum_{n=1}^{n_c} [r(\omega_c \tau + 2\pi(n-1)) - r(\omega_c \tau + 2\pi(n-2))]. \end{aligned} \right. \quad (6)$$

Для системи рівнянь (6) час змінюється в межах $\frac{2\pi}{\omega_c} \leq \tau \leq \frac{4\pi}{\omega_c}$, тобто визначається

тривалістю знаходження шару на верхньому витку спіралі.

Вологість шару матеріалу в довільний момент часу τ :

$$W = W(\tau), \quad (7)$$

де τ – час сушіння.

Враховуючи залежність (7), вологість кожного з шарів, що в момент часу сушіння τ знаходяться вздовж вертикальної осі y та утворюють шар загальною висотою H , можна записати:

$$\begin{cases} W_1 = W(\tau); \\ W_2 = W\left(\tau + \frac{2\pi}{\omega_c}\right); \\ W_3 = W\left(\tau + \frac{4\pi}{\omega_c}\right); \\ \dots \\ W_n = W\left(\tau + \frac{2\pi(n-1)}{\omega_c}\right). \end{cases} \quad (8)$$

Аналогічно до системи (6), час для системи (7) змінюється в межах $\frac{2\pi}{\omega_c} \leq \tau \leq \frac{4\pi}{\omega_c}$.

Зміна швидкості повітряного потоку за висотою шару матеріалу згідно [3]:

$$\omega = \omega_0 e^{-\frac{\xi \mu h}{2d_{ek}}}, \quad (9)$$

де ω_0 – початкова швидкість повітряного потоку віднесена до перерізу всього шару, м/с;

ξ – коефіцієнт аеродинамічного опору шару;

μ – структурний фактор;

h – висота шару матеріалу на якій визначається швидкість СА, м;

d_{ek} – еквівалентний діаметр для шару матеріалу, м.

Коефіцієнт аеродинамічного опору шару матеріалу можна визначити за співвідношенням Стокса [4]:

$$\xi = \frac{24}{Re}, \quad (10)$$

де Re – критерій Рейнольдса.

Значення критерію Рейнольдса [4]:

$$Re = \frac{\omega_0 d_{ek}}{\psi \nu}, \quad (11)$$

де ψ – об'ємна пористість шару матеріалу;

ν – кінематична в'язкість СА, м²/с.

Структурний фактор за О.Крішером [4]:

$$\mu = \mu_F \mu_h, \quad (12)$$

де μ_F – коефіцієнт, що являє собою відношення площі поверхні пор до площі поперечного перерізу цих пор, приймаємо згідно [4] $\mu_F = 1/\psi$;

μ_h – коефіцієнт покрученості шару матеріалу, що являє собою відношення довжини шляху проходження СА через шар матеріалу до висоти шару.

Якщо замінити шар матеріалу моделлю з сферичних частинок правильного вкладання (ромбічне чотирикутне вкладання), то згідно [5] коефіцієнт покрученості моделі шару визначається таким чином $\mu_h = 3,52\psi$.

Еквівалентний діаметр шару матеріалу [4]:

$$d_{ek.} = \frac{4V_n}{S_n}, \quad (13)$$

де V_n – об'єм пор у шарі матеріалу, м³;

S_n – площа поверхні пор у шарі матеріалу, м².

Так як $V_n = \psi V_m$ (де V_m – об'єм шару матеріалу), тоді розглядаючи одиницю об'єму шару матеріалу (1 м³), вираз (13) можна записати:

$$d_{ek.} = \frac{4\psi}{S'_n}, \quad (14)$$

де S'_n – площа поверхні пор в одиниці об'єму шару матеріалу (1 м³), м².

Величина S'_n визначається шляхом розрахунку за результатами експериментальних досліджень таким чином:

– визначається гранулометричний склад матеріалу (кількісний розподіл частинок матеріалу за величиною);

– визначається об'єм матеріалу в шарі, утвореному з частинок однієї фракції (однакового розміру), для цього формується шар матеріалу з частинок однієї фракції, заповнюється толуолом, після чого шляхом віднімання від загального об'єму шару фракції об'єму толуолу, визначається об'єм матеріалу (аналогічно проводиться визначення об'єму матеріалу всіх фракцій);

– здійснюється перехід від реального шару до моделі шару матеріалу, що сформована з кульок різного діаметру; для цього для кожної з фракцій визначається кількість кульок моделі радіусом, що рівний радіусу отвору через який частинки фракції не пройшли, таким чином: визначається об'єм кульки моделі $V_k = \frac{4}{3}\pi R^3$ (де R – радіус кульки (отвору)); визначається кількість кульок в моделі фракції m_n шляхом ділення об'єму частинок в шарі певної фракції на об'єм V_k ;

– оскільки площа поверхні кульки $S = 4\pi R^2$, тоді площу поверхні пор S'_n можна виразити так:

$$S'_n = 4\pi \sum_{n=1}^z m_n R_n^2, \quad (15)$$

де m_n – кількість кульок в моделі шару радіусом R_n (в 1 м³ шару матеріалу);

z – кількість фракцій, на які розділяється матеріал під час визначення гранулометричного складу, шт.;

R_n – радіус, що рівний радіусу отвору сита через яке ці частинки не пройшли під час гранулометричного аналізу шару, м.

Позначимо через $K_s = \sum_{n=1}^z m_n R_n^2$ і назовемо коефіцієнтом поверхневої площі частинок в шарі матеріалу з розмірністю м².

Після підстановки коефіцієнта K_s в формулу (14), отримаємо:

$$d_{ek.} = \frac{\Psi}{\pi K_s}. \quad (16)$$

Підставляючи (16) та значення μ_F в залежність (9), отримаємо:

$$\omega = \omega_0 \cdot e^{\frac{\xi \pi \mu_h K_s h}{2 \Psi^2}}. \quad (17)$$

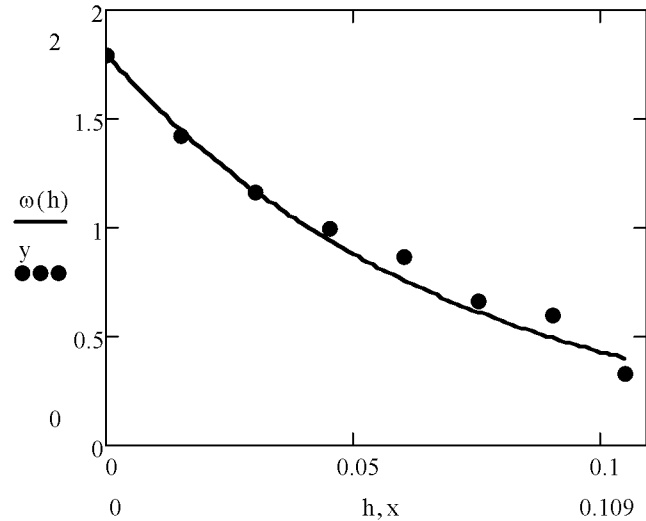
Підставляючи в залежність (17) значення висоти окремих шарів матеріалу з системи (6), можна визначити зміну швидкості потоку СА як за висотою окремого шару, так і за загальною висотою шару матеріалу H .

Таким чином, об'єднуючи системи (6), (8) та враховуючи залежність (17), отримаємо математичну модель, що дозволяє встановити зміну швидкості потоку СА за висотою шару матеріалу в запропонованій сушарці:

В системі (18) значення об'ємної пористості ψ визначається експериментально. Крім того, під час виведення рівнянь в системі (18) для спрощення зроблено припущення, що усушка частинок матеріалу незначна, відповідно значення об'ємної пористості для всіх шарів однакове.

$$\left\{ \begin{array}{l} h_n = r(\omega_c \tau + 2\pi(n-1)) - r(\omega_c \tau + 2\pi(n-2)); \\ W_n = W \left(\tau + \frac{2\pi(n-1)}{\omega_c} \right); \\ \omega_n = \omega_{n+1} \cdot e^{\frac{\xi \pi \mu_h K_s h_n}{2 \Psi^2}}; \\ \omega_{n_c+1} = \omega_0; \\ \omega_H = \omega_2 \cdot e^{\frac{\xi \pi \mu_h K_s h_2}{2 \Psi^2}}; \\ H = \sum_{n=1}^{n_c} [r(\omega_c \tau + 2\pi(n-1)) - r(\omega_c \tau + 2\pi(n-2))]; \\ r(\varphi) = r_0 + t\varphi - Kr_0 e^{m\varphi}; \\ \frac{2\pi}{\omega_c} \leq \tau \leq \frac{4\pi}{\omega_c}; n = 1, 2, \dots, n_c. \end{array} \right. \quad (18)$$

Використовуючи рівняння (17), побудуємо графічну залежність зміни швидкості СА за загальної висотою шару насіння вороху трав H та порівняємо з експериментальними даними (рис.2).



$$\psi=0,69; \nu=18,6 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}; \omega_0=1,8 \text{ м/с}; K_s=47,86$$

Рисунок 2 - Залежність зміни швидкості повітряного потоку ω від висоти шару h (теоретична крива та експериментальні точки)

Порівняльний аналіз теоретичних та експериментальних даних вказує на те, що отримані теоретичні залежності з достатньою точністю дозволяють описати процес вентилявання шару насіння вороху трав. Незначне розходження у значеннях зі збільшенням висоти шару можна пояснити зміною пористості за висотою реального шару в сушарці. Таким чином, за моделлю (18) можна визначити зміну швидкості повітряного потоку за висотою шарів матеріалу з врахуванням їх аеродинамічних та структурних характеристик.

Список літератури

1. Патент на винахід № 85766 Україна, МПК F26B11/00. Барабанна сушарка / Дударев І.М., Кірчук Р. В., Кокалюк Л.Ю.; Заявлено 01.06.2007; Опубл. 25.02.2009, Бюл. №4.
2. Кокалюк Л.Ю., Кірчук Р.В., Дударев І.М. Обґрунтування параметрів барабанної сушарки. Сільськогосподарські машини: Зб. наук. ст. – Вип. 18. – Луцьк: Ред. – вид. відділ ЛНТУ, 2009. – С. 186-193.
3. Дударев І.М., Голячук С.Є., Лук'янчук Т.М. Дослідження впливу аеродинамічних параметрів шару гірчиці на процес його вентилявання. Сільськогосподарські машини: Зб. наук. ст. – Вип. 17. – Луцьк: Ред. – вид. відділ ЛНТУ, 2008. – С. 40-45.
4. Кришер О. Научные основы техники сушки. Перевод с нем. к.т.н. Д.М.Левина. Под ред. проф., д.т.н. А.С.Гинзбурга. – М.: Изд. Иностран. Лит-ры, 1961. – 535 с.
5. Лыков А.В. Тепломассообмен: (Справочник), 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергия, 1978. – 480 с.

Л. Кокалюк, І. Дударев, Р. Кірчук

Исследования структурных и аэродинамических характеристик вороха семян трав

В статье исследованы структурные и аэродинамические характеристики вороха семян трав. Предложена методика определения структурных характеристик слоя вороху. Представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований изменения скорости воздушного потока от высоты слоя вороху с учетом его структурных характеристик.

L. Kokalyuk, I. Dudarev, R. Kirchuk

The research of aerodynamic characteristic of the herb seed layer pile

In the article the structural and aerodynamic properties of herb seed layer are investigated. The methodic of definition of properties of layer is proposed. The results of theoretical and experimental investigations of air flow speed change against layer height considering its structural properties represented.

Одержано 06.09.09