

**І.О.Скриннік, канд. техн. наук, В.В.Яцун, канд. техн. наук,  
В.В.Дарієнко, канд. техн. наук, Д.В. Богатирьов, доц., канд. техн. наук,  
М.О.Федотова, ас.**

*Кіровоградський національний технічний університет*

## Математична модель руху насіння по каскадам зерносушарки каскадного типу

В статті розглянуто рух насіння по каскадам зерносушарки. Наведені дослідження, які дозволяють теоретично визначити конструктивні параметри сушарки з урахуванням особливостей руху насіння.

**каскад, зерносушарка каскадного типу, псевдозрідений шар насіння, повітряний потік**

Сушіння зерна та насіння є основною технологічною операцією по приведенню його в стійкий стан. Необхідність і своєчасність штучного сушіння зернових культур викликана підвищеною післязбиральною їх вологістю. До 80% врожаю всіх зернових культур, що поступають на хлібозбиральні підприємства або на токи господарів, мають підвищену вологість під час збирання до 35-45% і обов'язково потребують додаткового сушіння. Тому забезпечення стійкого збереження і стабілізація якості насіння можуть бути досягнуті тільки своєчасним, якісним і інтенсивним сушінням [1].

На сьогодні запропоновано багато технічних рішень для сушіння насіння за фізико – механічними властивостями. Але слід відмітити, що більшість з них не забезпечують агротехнічні вимоги або економічно не ефективні [2].

На кафедрі сільськогосподарського машинобудування Кіровоградського національного технічного університету розроблено конструкцію зерносушарку каскадного типу [4].

Мета дослідження полягає в визначенні положення частинки в залежності від параметрів установки, шару насіння та процесу сушки.

Для подальших теоретичних досліджень руху частинки під час сушіння обґрунтовуємо модель сипучого тіла (шару насіння, що піддається псевдозріденню на поверхні решета зерносушарки). В основу даної роботи покладена узагальнена і розвинена модель сипучого тіла Л.В. Гячева [3], що дозволяє розглядати процес руху сипучих матеріалів в повітряному каналі.

Модель характеризується наступними допущеннями:

1. Сили внутрішнього тертя між частинками і сили тертя частинок об стінку каналу пропорційні відповідним нормальним зусиллям (закон Кулона).
2. Частинки, з яких складається сипуче тіло, являють собою однакові абсолютно тверді кулі з деяким постійним кутом укладання в об'ємі каналу.
3. У процесі руху кулі не обертаються.
4. Рух частинок у потоці відбувається по пересічним траєкторіям, що являє собою лінії ковзання сипучого тіла.
5. Через малий розмір частинок сипуче тіло можна замінити еквівалентним в механічному змісті суцільним середовищем.

6. Кут природного скосу дорівнює приведеному куту внутрішнього тертя.

7. Величина кута нахилу решітки до горизонту  $\alpha$  для кожного каскаду змінюється за наступною залежністю:

$$\alpha_i = \alpha_1 + \Delta\alpha, \quad (1)$$

де  $\alpha_1$  – кут нахилу попереднього (верхнього) решета;

$\Delta\alpha$  - величина зміни кута  $\alpha$ .

Розглянемо рух частинки під час процесу сушіння. Спочатку частинки знаходяться у щільній укладці в об'ємі бункера, а потім надходять на каскад. Далі частинка рухається по каскаду в киплячому шарі насіння і надходить до клапана. Наступним етапом руху є сходження з каскаду (вільне падіння). Потім етапи руху повторюються, тобто частинка надходить на каскад, рухається по ньому, сходить і поступає на нижній. Проаналізувавши етапи руху частинки можна дійти до висновку, що детерміновану математичну модель руху можна записати в наступному вигляді:

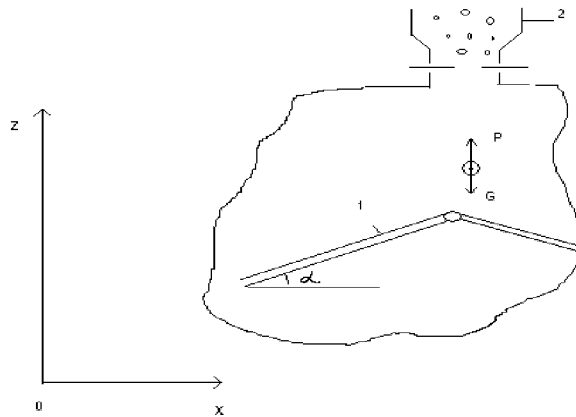
$$X(t) = \begin{cases} \text{по осі } OX \\ x_0 = f(t) \\ x_1 = f(t) \\ \dots \\ x_m = f(t) \end{cases}; \quad Z(t) = \begin{cases} \text{по осі } OZ \\ z_0 = f(t) \\ z_1 = f(t) \\ \dots \\ z_m = f(t) \end{cases}, \quad (2)$$

де  $m$  – число етапів:  $m = n + 1$ ;

$n$  – кількість каскадів;

$z_0, x_0$  – початковий етап, коли частинка рухається від бункера до першого каскаду.

Розглянемо рух на початковому етапі надходження частинки з бункера до каскаду.



1 – каскад; 2 – бункер

$P$  – сила лобового тиску повітряного потоку;  $G$  – гравітаційна сила

Рисунок 1 – Схема руху частинки на початковому етапі

Гравітаційна сила

$$G = m_3 \cdot \left( \frac{\rho_3}{\rho_c} - 1 \right) \cdot g_3,$$

де  $m_3$  - маса частинки 3, кг;  $\rho_3$  - густина частинки, кг/м<sup>3</sup>.

$$P = k \cdot f \cdot \rho_c \cdot c^2,$$

де  $k$  – коефіцієнт лобового опору середовища;  $f$  – міделевий перетин частинок,  $m^2$ ;  
 $\rho_c$  – густина середовища,  $kg/m^3$ ;  $c$  – швидкість повітряного потоку,  $c = V_\phi$ ,  $m/s$ ;  
 $m_3$  – маса частинок,  $kg$ ;  $g$  – прискорення вільного падіння  $m/s^2$ .

### Запишемо рівняння руху по осям

$OX \quad \Sigma X = 0; X_0 = 0;$

$OZ \quad \Sigma Z = 0; P - G = 0$ , вирішимо рівняння і знайдемо прискорення  $a_z$ .

Тоді

$$m_3 a_z = k f \rho_c v^2 c - m_3 g = 0,$$

$$a_{z_0} = \frac{k \cdot f \cdot \rho_c \cdot c^2 - m_3 \cdot g}{m_3} . \quad (3)$$

Складаємо рівняння руху по осям.

$X_0 = 0$

$$z_0 = \frac{\left( \frac{k \cdot f \cdot \rho_c \cdot c^2 - m_3 g}{m_3} \right)}{2} \cdot t_0^2 . \quad (4)$$

Другий етап руху – рух частинки в киплячому шарі на похилому решеті (рис. 2).

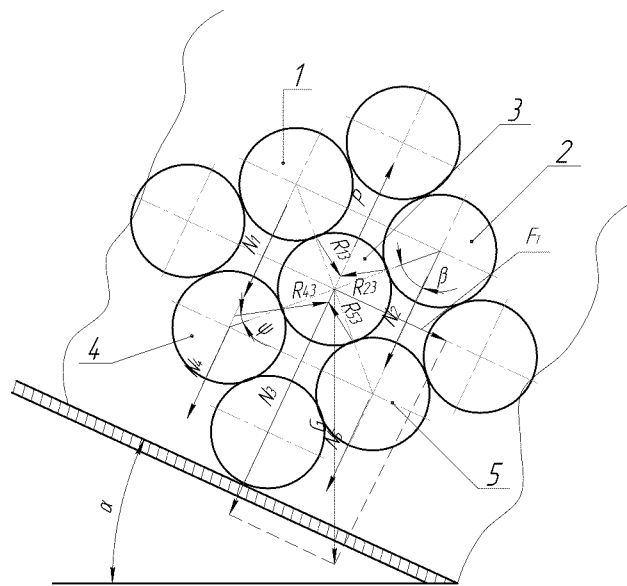


Рисунок 2 – Схема сил, які діють на частинку 3, яка знаходиться в псевдозрідженому шарі насінин на каскаді зерносушарки

В момент вклинювання частки 3 між частинками 1, 2, 4, 5 сили реакцій  $R_{13}$   $R_{23}$   $R_{43}$   $R_{53}$  відхиляються від нормалі на кут внутрішнього тертя  $\psi$  в сторону збільшення кута укладки  $\beta$ . В результаті чого, сили реакцій складають з нормаллю кут  $\gamma = \alpha + \beta + \psi$ , де  $\alpha$  - кут нахилу пористої перегородки до горизонту. На частку діють такі сили:

- 1) гравітаційна сила;
- 2) сила лобового тиску повітряного потоку  $P$ ;
- 3) нормативного тиску  $N_3 = m_3 \cdot \left( \frac{\rho_3}{\rho_c} - 1 \right) g \cdot \cos \alpha$ ;

4) тангенційна сила  $F = m_3 \cdot \left( \frac{\rho_3}{\rho_c} - 1 \right) g \cdot \sin \alpha$ ;

5) взаємодії між частинками (сили реакції)

$$R_{13} = \frac{N}{\cos \gamma}; R_{23} = -\frac{N_2}{\cos \gamma}; R_{43} = \frac{P - N_4}{\cos \gamma}; R_{43} = \frac{P - N_5}{\cos \gamma}.$$

Складемо рівняння рівноваги частки 3 під дією прикладених до неї сил, відносно осей координат  $XOZ$ . Підставивши значення сил реакції та зробивши необхідні математичні перетворення отримуємо:

$$\begin{aligned} \sum X = 0; \quad F_p &= -((P - N_4 + N_2) - (N_1 - P + N_5)); \\ \sum Z = 0; \quad P - N_3 &= -((P - N_4 + N_2) - (N_1 - P + N_5)) \cdot \operatorname{tg} \gamma. \end{aligned} \quad (5)$$

Значення густин частинок 1, 2, 4, та 5 невідоме, то підставляємо значення  $F$  в рівняннях руху по осі  $OZ$  і отримуємо:

$$P - N_3 = F \cdot \operatorname{tg} \gamma. \quad (6)$$

Підставивши вираз (5) в рівняння руху (4) знаходимо прискорення по осям:

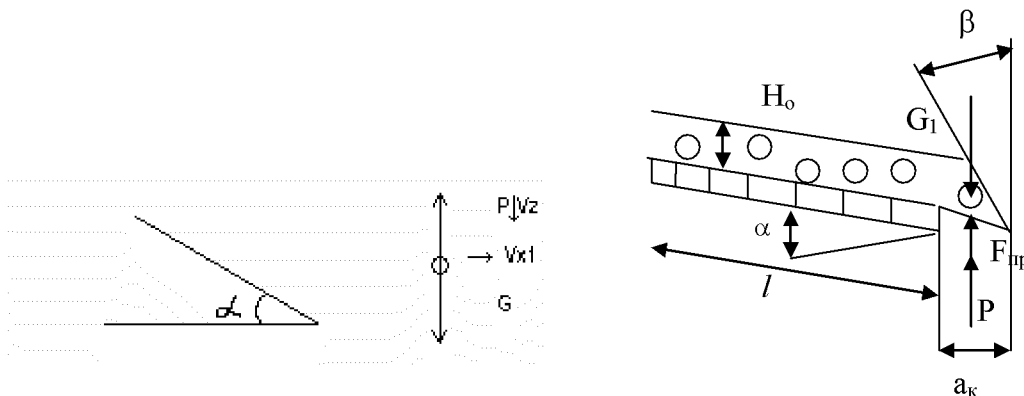
$$a_{x1} = \frac{d^2 x}{dt^2} = \frac{(P - N_3) \cdot \operatorname{ctg} \gamma + F}{m_1 \cdot \left( \frac{\rho_3}{\rho_c} - 1 \right)}; \quad a_{z1} = \frac{d^2 z}{dt^2} = \frac{(P - N_3) - F \cdot \operatorname{tg} \gamma}{m_1 \cdot \left( \frac{\rho_3}{\rho_c} - 1 \right)}.$$

Складемо рівняння руху по осям

$$x_1 = \frac{a_{x1} \cdot t^2}{2}, \quad z_1 = V_{z0} \cdot t_0 + \frac{a_{z1} \cdot t^2}{2}.$$

Розглянемо рух частинок коли вони сходять з решета (каскаду). Згідно (рис. 3, а) складаємо рівняння руху з урахуванням того, що частинка сходить з початковою швидкістю  $V_{z1}, V_{x1}$ :

$$\begin{aligned} x_2 &= V_{x1} \cdot t_1, \\ z_2 &= V_{z1} \cdot t_1 + \frac{2(k \cdot f \cdot \rho_c \cdot V_{\phi 1}) \cdot t_2^2}{m}. \end{aligned}$$



а) – Руху частинки у момент сходження з каскаду

б) – Дії сил на клапан під час роботи

Рисунок 3 – Розрахункові схеми

Для усунення закидання частинок повітряним потоком знову на поверхню каскаду конструкцією передбачено встановлення клапанів (рис. 3, б). Клапан піддається дії наступних сил:

$$P_0 + F_{np} - G_1 = 0; \quad G_1 = m_1 \cdot g = \rho_3 \cdot g \cdot V_{кл}.$$

Об'єм шару насіння, що займає клапан визначається з виразу

$$V_{кл} = a \cdot a_k \cdot l_k,$$

де  $a$  – ширина каскаду, м;  $a_k$ ;

$l_k$  – ширина та довжина клапана, м.

Умова спрацювання клапана

$$P + F_{np} < G \quad \text{або} \quad k \cdot t_k \cdot \rho_0 \cdot v_{\phi}^2 + F_{np} < \rho_3 \cdot V_{кл} \cdot g, \quad \text{тобто} \quad F_{np} < G_1 - P.$$

Час за який наповнюється об'єм клапана

$$t_{кл} = \frac{V_{кл}}{V_{ш}},$$

$V_{ш}$  – швидкість шару, м/с.

$$V_{ш} = V_{ox}.$$

Так як етапи руху частинки повторюються, то рівняння руху по осям  $Ox$  та  $Oz$  можна навести у вигляді наступних залежностей:

$$Z(t) = \begin{cases} z_0 = V_{oz} \cdot t_0 + \frac{a_{z0} \cdot t_0^2}{2} \\ z_1 = V_{zo} \cdot t_0 + \frac{a_{z1} \cdot t_1^2}{2} \\ z_2 = V_{z1} \cdot t_1 + \frac{a_{z2} \cdot t_2^2}{2} \\ \dots \\ z_{m-1} = V_{z(m-2)} \cdot t_{m-2} + \frac{a_{zm-1} \cdot t_{m-1}^2}{2} \\ z_m = V_{z(m-1)} \cdot t_{m-1} + \frac{a_{zm} \cdot t_m^2}{2} \end{cases}; \quad X(t) = \begin{cases} x_0 = 0 \\ x_1 = \frac{a_{x1} \cdot t_1^2}{2} \\ x_2 = V_{x1} \cdot t \\ x_3 = \frac{a_{x3} \cdot t^2}{2} \\ \dots \\ x_{m-1} = V_{xm-2} \cdot t \\ x_m = \frac{a_{xm} \cdot t^2}{2} \end{cases}.$$

При цьому швидкість фільтрації змінюється за законом в залежності від каскаду:

$$V_{\phi} = \frac{L_i}{L_2} \sqrt{\frac{1.1(\Delta P_{шi} + \Delta P_{pi})}{(1-\varepsilon)\rho_3}},$$

де  $\varepsilon$  – шпаруватість шару;  $\Delta P_{шi}$  – опір шару насіння на  $i$ -тому каскаді, Па;

$\Delta P_{pi}$  – опір решета на  $i$ -тому каскаді, Па;

$L_i, L_2$  – довжина  $i$ -того каскаду та ширина сушарки, м.

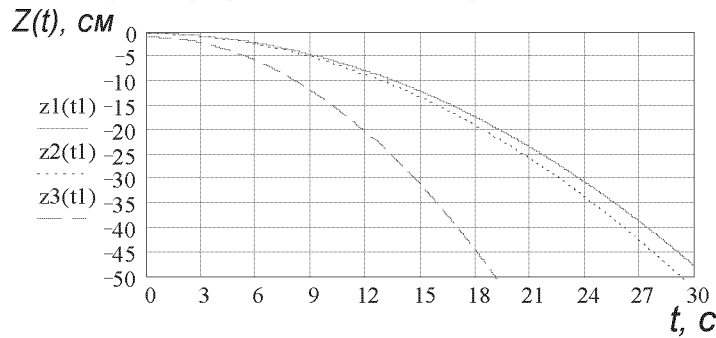
Тоді сила лобового тиску буде змінюватися в залежності від каскаду

$$P_i = k \cdot f_m \cdot p_c \cdot \left( \frac{V_{\phi i}}{2} \right).$$

Кут нахилу решіт до горизонту змінюється за формулою (1), що впливає на складові прискорення по осям наступним чином:

$$a_{x_i} = \frac{(P_i - N_3) \cdot ctg(\gamma_{i-1} + \Delta\alpha) + F}{m \left( \frac{\rho_3}{\rho_c} - 1 \right)}; \quad a_{z_i} = \frac{(P_i - N_3) \cdot Ftg(\gamma_{i-1} + \Delta\alpha)}{m \left( \frac{\rho_3}{\rho_c} - 1 \right)}$$

Під час чисельного експерименту за допомогою пакету прикладних програм MathCAD отримали наступні графічні залежності (рис. 4).



$z_1(t)$  – пшениця;  $z_2(t)$  – соя;  $z_3(t)$  – соняшник

Рисунок 4 – Залежність переміщення частинки по осі 0Z від часу (t) знаходження в сушильній камері для різних сільськогосподарських культур

Отримані залежності показують, що на час руху частинок по каскадам впливають як параметри сушарки (робочий тиск, кут нахилу каскадів, геометричні розміри решета та його аеродинамічний опір), так і фізико-механічні властивості насіння (форма, вага, шорсткість) та шару в цілому (кут укладки, шпаруватість шару).

Експериментально встановлено область раціональних значень параметрів зерносушарки каскадного типу, при яких спостерігається підвищення якісних показників роботи (ефект сушіння для зернових культур  $W=74-92\%$ , продуктивність  $Q=0,22-0,54$  т/год, при енергетичних витратах  $E=10-12,5$  кВт/т):

- тиск в сушильній камері –  $P_1=500-600$  Па;
- температура в сушильній камері –  $t_1=110-130$  °С;
- товщина шару матеріалу –  $h=0,01-0,02$  м;
- кут нахилу робочих каскадів –  $\alpha=3-9$  °.

Продуктивність для пшениці 0,218-0,55 т/год, сої 0,37-0,41т/год, соняшника 0,218-0,25т/год.

## Список літератури

1. Котов Б.І., Коваль С.М., Шустик Л.П., Цема Т.В. Технічні засоби для зберігання зерна в господарствах України // Пропозиція, 1999. № 11. – С. 25-27.
2. Соколов А.Я. Технологическое оборудование предприятий по хранению и переработке зерна. – М.: Колос, 1975. – 496 с.
3. Гячев Л.В. Движение сыпучих материалов в трубах и бункерах. – М.: Машиностроение, 1967. – 196 с.
4. Петренко М.М., Скринник І.О. Зерносушильна установка касетного типу // Збірник наукових праць КДТУ (техніка в сільськогосподарському машинобудуванні, галузеве машинобудування, автоматизація). Випуск 15. – Кіровоград: КДТУ, 2004. – С.323 - 328.

*И.Скринник, В.Яцун, В.Дариенко, Д.Богатырев, М.Федотова*

**Математическая модель движения семян по каскадам зерносушилки каскадного типа**

В статье рассмотрено движение семян по каскадам зерносушильной установки. Приведены исследования, которые позволяют теоретически определить конструктивные параметры сушиллки с учетом особенностей движения семян.

*I.Skrynnik, V.Jatsun, V.Darienko, D.Bogatyrev, M.Fedotova*

**Mathematical model of movement of seeds on cascades grain-dryer cascadetype**

In the article motion of seed is considered for to the cascades of the installation for dry grain in the booling layer. Researches which allow in theory to define the structural parameters of dryer taking into account the features of motion of seed are resulted.

Отримано 21.10.11