

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ РУХУ ЧАСТИНОК БУДІВЕЛЬНОГО МАТЕРІАЛУ ПО КАСКАДАМ СУШАРКИ КАСКАДНОГО ТИПУ

Скриннік І.О., Богатирьов Д.В., Дарієнко В.В., Яцун В.В.

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

Постановка проблеми у загальному вигляді. Сушіння будівельного матеріалу є основна технологічна операція по приведенню його в стійкий стан.

На сьогодні запропоновано багато технічних рішень для сушіння будівельного матеріалу за фізико – механічними властивостями. Але слід відмітити, що більшість з них не забезпечують відповідних вимог або економічно не ефективні [2, 3, 4, 5].

На кафедрі будівельні, дорожні машини та будівництво Кіровоградського національного технічного університету розроблено конструкцію сушарки каскадного типу.

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

Для подальших теоретичних досліджень руху частинки під час сушіння обґрунтовуємо модель сипучого тіла (шару матеріалу, що піддається псевдозрідженню на поверхні решета сушарки). В основу даної роботи покладена узагальнена і розвинена модель сипучого тіла Л.В. Гячєва [1], 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 α для кожного каскаду змінюється за наступною залежністю:

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

де α_1 – кут нахилу попереднього (верхнього) решета;

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

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 буд. матеріалу 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, сходиться і поступає на нижній. Проаналізувавши етапи руху частинки можна дійти до висновку, що детерміновану математичну модель руху можна записати в наступному вигляді:

по осі OX

$$X(f) = \begin{cases} x_0 = f(t) \\ x_1 = f(t) \\ \dots\dots\dots \\ x_m = f(t) \end{cases}$$

по осі OZ

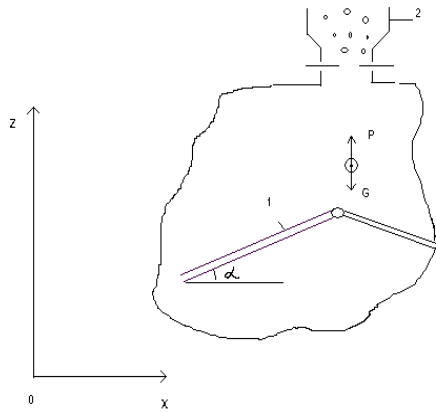
$$Z(t) = \begin{cases} z_0 = f(t) \\ z_1 = f(t) \\ \dots\dots\dots \\ z_m = f(t) \end{cases} \quad (2)$$

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; ρ_3 – густина частинки, кг/м³

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

де k – коефіцієнт лоб. опору середовища;

f – міделевий перетин частинок, м²;

ρ_c – густина середовища, кг/м³;

c – швидкість повітряного потоку, c = V_ф,

м/с;

m_3 – маса частинок, кг;

g – прискорення вільного падіння м/с².

Запишемо рівняння руху по осям

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

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

$$\text{Тоді} \quad m_3 a_z = k \cdot f \cdot \rho_c \cdot v^2 \cdot c - m_3 \cdot g = 0,$$

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

Складаємо рівняння руху по осям.
 $X_0 = 0$

$$z_0 = \frac{\left(\frac{k \cdot f \cdot \rho_c \cdot c^2 - m_3 g}{m_3} \right)}{2} \cdot t_0^2. \quad (3)$$

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

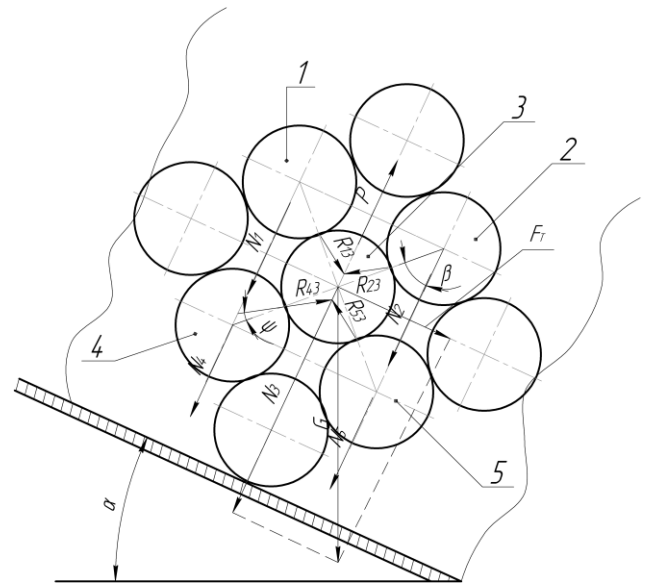


Рисунок 2 – Схема сил, які діють на частинку 3, яка знаходиться в псевдозрідженому шарі матеріалу на каскаді сушарки

В момент вклинювання частки 3 між частинками 1, 2, 4, 5 сили реакції R_{13} R_{23} R_{43} R_{53} відхиляються від нормалі на кут внутрішнього тертя ψ в сторону збільшення кута укладки β . В результаті чого, сили реакції складають з нормаллю кут $\gamma = \alpha + \beta + \psi$, де α – 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) тангенціальна сила

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

5) взаємодії між частинками (сили реакції)

$$R_{13} = \frac{N}{\cos \gamma}, \quad R_{23} = -\frac{N_2}{\cos \gamma},$$

$$R_{43} = \frac{P - N_4}{\cos \gamma}, \quad R_{53} = \frac{P - N_5}{\cos \gamma}.$$

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

$$\sum X = 0;$$

$$F_p = -((P - N_4 + N_2) - (N_1 - P + N_5)); \quad (4)$$

$$\sum Z = 0;$$

$$P_0 - N_3 = -((P - N_4 + N_2) - (N_1 - P + N_5)) \cdot \operatorname{tg} \gamma$$

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

$$P - N_3 = F \cdot \operatorname{tg} \gamma. \quad (5)$$

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

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

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

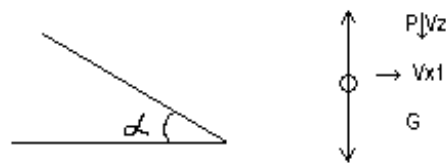
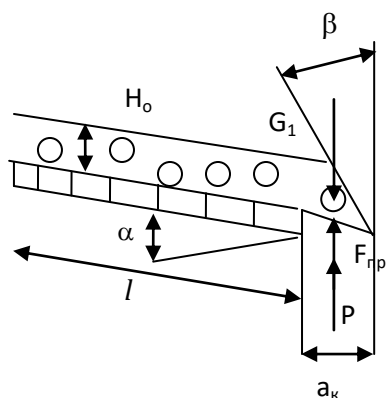
Складемо рівняння руху по осям

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

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

$$x_2 = V_{x1} \cdot t_1$$

$$z_2 = V_{z1} \cdot t_1 + \frac{2(k \cdot f \cdot \rho_c \cdot V_{\phi 1}) \cdot t_2^2}{m}$$



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:

$$P_0 + F_{np} - G_1 = 0,$$

$$G_1 = m_1 \cdot g = \rho_3 \cdot g \cdot V_{кл}.$$

Об'єм шару матеріалу, 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

$$P + F_{np} < G \quad \text{або}$$

$$k \cdot t_k \cdot \rho_0 \cdot V_{\phi}^2 + F_{np} < \rho_3 \cdot V_{кл} \cdot g, \quad \text{тобто}$$

$$F_{np} < G_1 - P.$$

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:

$$Z(t) = \begin{cases} z_0 = V_{z0} \cdot t_0 + \frac{a_{z0} \cdot t_0^2}{2} \\ z_1 = V_{z1} \cdot t_1 + \frac{a_{z1} \cdot t_1^2}{2} \\ z_2 = V_{z2} \cdot t_2 + \frac{a_{z2} \cdot t_2^2}{2} \\ \dots \\ z_{m-1} = V_{z(m-2)} \cdot t_{m-2} + \frac{a_{zm-1} \cdot t_{m-1}^2}{2} \\ z_m = V_{z(m-1)} \cdot t_{m-1} + \frac{a_{zm} \cdot t_m^2}{2} \end{cases},$$

$$X(t) = \begin{cases} x_0 = 0 \\ x_1 = \frac{a_{x1} \cdot t_1^2}{2} \\ x_2 = V_{x1} \cdot t \\ x_3 = \frac{a_{x3} \cdot t^2}{2} \\ \dots \\ x_{m-1} = V_{xm-2} \cdot t \\ x_m = \frac{a_{xm} \cdot t^2}{2} \end{cases}.$$

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

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

де ε – порозність шару; ΔP_{ui} – опір шару матеріалу на і-тому каскаді, Па;

ΔP_{pi} – опір решета на і-тому каскаді, Па;

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

Тоді сила лобового тиску буде змінюватися в залежності від каскаду

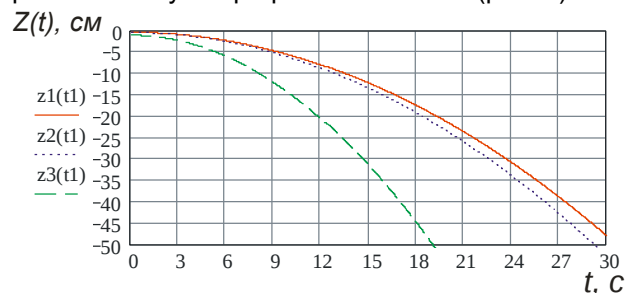
$$P_i = k \cdot f_m \cdot p_c \cdot \left(\frac{V_{\phi i}}{2} \right).$$

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

$$a_{xi} = \frac{(P_i - N_3) \cdot \text{ctg}(\gamma_{i-1} + \Delta\alpha) + F}{m \left(\frac{\rho_3}{\rho_c} - 1 \right)},$$

$$a_{zi} = \frac{(P_i - N_3) \cdot F \text{tg}(\gamma_{i-1} + \Delta\alpha)}{m \left(\frac{\rho_3}{\rho_c} - 1 \right)}.$$

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



$z_1(t)$ – частинки матеріалу 3мм; $z_2(t)$ – частинки матеріалу 4мм; $z_3(t)$ – частинки матеріалу 5мм

Рисунок 4 – Залежність переміщення частинки по осі OZ від часу (t) знаходження в сушильній камері для різних частинок матеріалів

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

Література

1. Гячев Л.В. Движение сыпучих материалов в трубах и бункерах. – М.: Машиностроение, 1967. – 196 с.
2. Теплотехнический справочник. Под общей редакцией В.И. Юренева и П.Д. Лебедева. Том 2. 2-ое изд. М: Энергия, 1976.
3. Гришин М.А., Атаназевич В.И., Семенов Ю.Г. Установки для сушки пищевых продуктов. Справочник. - М.: Агропромиздат, 1989. – 292 с.
4. Павлов К.Ф., Романков П.Г., Посков А.А. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии. Л.: Химия, 1981. – 202 с.
5. Сушильные аппараты и установки. Каталог НИИХИММАШ. 3-е изд., М.:, 1975. – 136 с.

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

В статье рассмотрено движение частиц строительного материала по каскадам сушильной установки. Приведены исследования, которые позволяют теоретически определить конструктивные параметры сушилки с учетом особенностей движения частиц.

In the article motion of chistic building material is considered on the cascades of the drying setting. Researches which allow in theory to define structural parametry dryers taking into account the features of motion of particles are resulted .