

## БУДІВНИЦТВО ТА ЦИВІЛЬНА ІНЖЕНЕРІЯ

УДК 621.181.7

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.6\(37\).2.108-120](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.6(37).2.108-120)**І.О. Скриннік**, доц., канд. техн. наук, **М.О. Федотова**, канд. техн. наук,**В.В. Дарієнко**, доц., канд. техн. наук*Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна**e-mail: Skrynnik\_2002@ukr.net*

## Теоретичні дослідження процесу руху сипучих будівельних матеріалів при сушінні в киплячому шарі каскадної сушарки в будівництві

В роботі розглянуто систему рівнянь руху потоку матеріалу, яка дозволяє визначити швидкість, траєкторію переміщення частинок, а також час перебування частинок у вільному робочому просторі апарата. Суттєвий вплив на визначення необхідного часу перебування частинок в апараті, чинить не тільки гідродинаміка потоків, а і кінетика процесу сушіння в апаратах киплячого шару. Дана робота присвячена розгляду саме цих нюансів.

**каскадна сушарка, киплячий шар, тверда фаза, сушіння матеріалу, волого'зем, час сушіння, псевдорозрідження, час контакту**

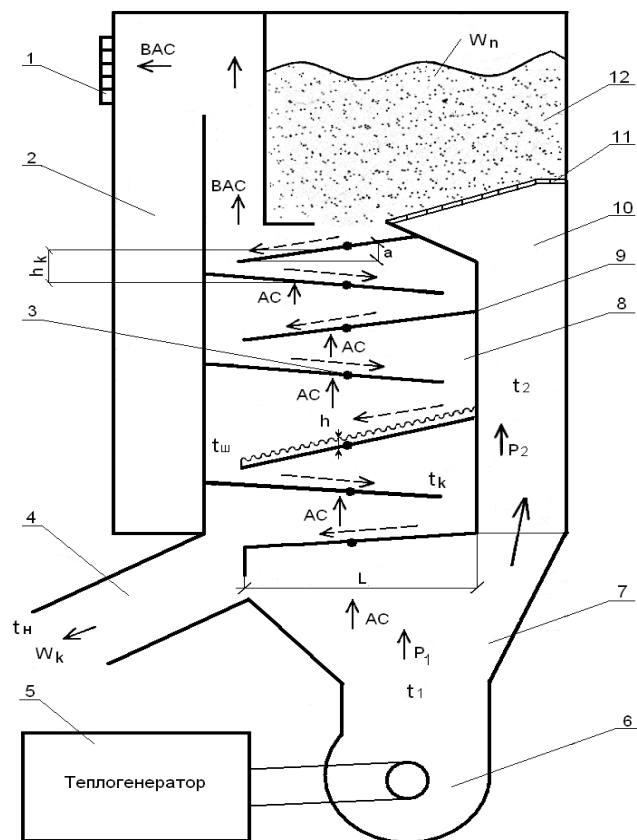
**Постановка проблеми.** Розвиток сучасного промислового виробництва ставить нові підвищені вимоги до техніки сушіння і технологічних, екологічних та економічних характеристик апаратного обладнання сучасних виробництв, спеціалізованих будівельних галузях.

Більшість матеріалів, що піддаються сушінню, являють собою дисперсні фази різного походження, як природнього так і штучного. Для реалізації цього процесу розроблені та впроваджені у виробництво апарати різноманітних конструкцій залежно від способу сушіння сировини [1].

На сучасному етапі розвитку промисловості актуальним питанням, що потребує вирішення, є пошук енергоефективних способів сушіння. Одним з ефективних методів здійснення процесів тепломасообміну є використання киплячого шару в апаратах з активним гідродинамічним режимом, що значно інтенсифікує технологічний процес та забезпечує високу якість готового продукту з необхідною кінцевою вологістю [2,3]. Використання киплячого шару характеризується рядом переваг, які відмічені у працях зарубіжних і вітчизняних науковців [4–9]. Разом із перевагами запропонованого способу проведення тепломасообмінних процесів слід зазначити, що здійснення сушіння в такому режимі потребує значної кількості енергії й витрат газового потоку [9,11]. Перспективним напрямом зменшення матеріальних та енергетичних витрат під час проведення тепломасообмінних процесів у киплячому шарі є використання багатоступеневого протитечійного контакту зріджувального агента та дисперсної фази. Такі процеси реалізуються в апаратах каскадного типу [10]. Використання наведеної організації руху потоків у застосуванні до процесів сушіння на цей час широко не висвітлено в сучасній науковій літературі, тому потрібні більш глибокий аналіз гідродинамічних умов та кінетики проведення цього процесу, розроблення надійних методів розрахунку каскадних сушарок.

Ефективності роботи сушильних апаратів для сушіння матеріалів у киплячому шарі, в значній мірі залежить від поля течії газового потоку, [6, 15], розподіл якого за робочим простором апарата впливає на профіль температур і концентрацій дисперсної (твердої) фази в газовому потоці [4]. Розгляд характеру руху газового потоку є важливим для встановлення закономірностей взаємодії його з твердою фазою [13, 16]. Визначення гідродинамічних умов руху потоку дає можливість математичного опису швидкості та часу перебування твердих частинок в апараті [16].

Здійснення процесу сушіння та показники його ефективності в киплячому шарі в значній мірі залежить від конструкції апарата. Важливим є вибір конструкції сушильного апарата, який в найкращій мірі відповідає фізико-хімічним властивостям матеріалу та необхідній продуктивності [1-10] рис 1. Визначення полів швидкостей газового потоку в робочому просторі апарата киплячого шару в комплексі з розрахунками швидкості переходу щільного шару матеріалу в киплячий стан, умов розширення шару матеріалу, робочих параметрів псевдозрідження та умов винесення матеріалу з апарата дозволяє провести оптимальний підбір конструктивних характеристик апарата такого типу [4-7].



1 – сітка відводу відпрацьованого агента; 2 – осадова камера; 3 – шарніри; 4 – патрубок для вивантаження просушеного матеріалу; 5 – теплогенератор; 6 – вентилятор; 7 – дифузор; 8 – сушильна камера; 9 – регулюючі каскади; 10 – труба для попереднього прогріву матеріалу; 11 – завантажувачий бункер з вологим матеріалом; 12 – сітка для потрапляння теплоносія в камеру попереднього нагріву;  $L$  – довжина каскаду, м;  $t_1$  – температура агента сушіння в сушильній камері, °C;  $t_2$  – температура агента сушіння у трубі попереднього прогріву, °C;  $P_1$  – тиск агента сушіння в сушильній камері, Па;  $P_2$  – тиск агента сушіння у трубі попереднього прогріву, Па;  $h$  – товщина часток матеріалу на каскаді, м;  $t_w$  – температура шару матеріалу на каскаді, °C;  $t_k$  – температура каскаду, °C;  $t_n$  – температура матеріалу після сушіння, °C;  $W_n$  – початкова вологість матеріалу до сушіння, %;  $W_k$  – кінцева вологість матеріалу після сушіння, %;  $h_k$  – висота між каскадами, м [12].

Рисунок 1 – Принципова схема сушарки каскадного типу для сушіння сипучих матеріалів в киплячому шарі

Джерело розроблено авторами

Для подальших теоретичних досліджень руху частинки під час сушіння обґрунтовуємо модель сипкого тіла (шару матеріалу, що піддається кипінню на поверхні каскаду сушарки). В основу моделі покладена узагальнена і розвинена модель сипкого тіла Л.В. Гячева [3, 14], яка дозволяє розглядати процес руху сипких матеріалів у повітряних каналах.

При моделюванні прийняті такі припущення.

1. Сили внутрішнього тертя між частинками і сили тертя частинок об стінку киплячого каналу пропорційні відповідним нормальним зусиллям (за законом Кулона).
2. Частинки, з яких складається сипке тіло, – це однакові абсолютно тверді кулі з деяким постійним кутом укладання в об'ємі каналу.
3. У процесі руху кулі (частинки) не обертаються.
4. Рух частинок у потоці відбувається по пересічних траєкторіях, що становлять собою лінії ковзання сипкого тіла.
5. Через малий розмір частинок сипке тіло можна замінити еквівалентним за механічним змістом суцільним середовищем.
6. Кут природного укусу дорівнює приведеному куту внутрішнього тертя.
7. Величина кута нахилу каскаду до горизонту  $\alpha$  для кожного каскаду змінюється за залежністю:  $\alpha_i = \alpha_{i-1} + \Delta\alpha$ , де  $\alpha_{i-1}$  – значення кута попереднього (нижнього каскаду);  $\Delta\alpha$  – приріст кута.

Розглянемо рух частинки на поверхні каскаду під час процесу сушіння (рис. 2.). Спочатку частинки знаходяться у щільній укладці в об'ємі бункера, а потім надходять на каскад. Далі кожна частинка рухається по каскаду в киплячому шарі. Наступним етапом її руху є сходження з каскаду (вільне падіння). Потім етапи руху повторюються, тобто частинка надходить на наступний нижній каскад, рухається по ньому, сходять і поступає на ще нижчий каскад. Виходячи з етапів руху частинки, можна математично описати її переміщення. В наявному варіанті маємо:

$$\begin{array}{l} \text{по осі } 0X \\ x(t) = \begin{cases} x_0 = f(t); \\ x_1 = f(t); \\ \dots \\ x_i = f(t); \\ \dots \\ x_{e_m} = f(t); \end{cases} \\ \text{по осі } 0Z \\ z(t) = \begin{cases} z_0 = f(t); \\ z_1 = f(t); \\ \dots \\ z_i = f(t); \\ \dots \\ z_{e_m} = f(t); \end{cases} \end{array} \quad (1)$$

де  $e_m$  – число етапів:  $e_m = i + 1$ ;  $i$  – кількість каскадів;

$x_1, x_i, z_1, z_i$ , – координати частинки на відповідних етапах руху.

Розглянемо рух частинки на початковому етапі. На частинку 1 (рис. 3) під час руху з бункера до каскаду діють такі сили:

- 1) гравітаційна:

$$G_n = m_n \left( \frac{\rho_n}{\rho_{ac}} - 1 \right) g, \quad (2)$$

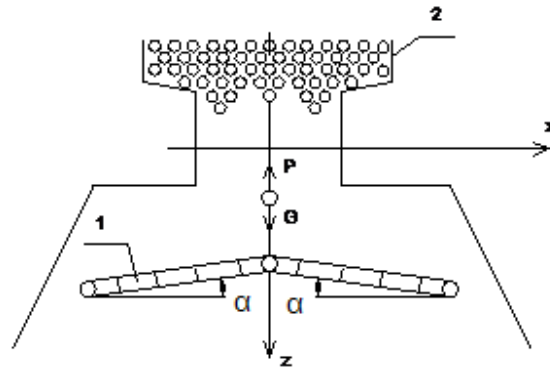
де  $m_n$  – маса насипаного матеріалу, кг;

$\rho_n$  – густина насипаного матеріалу,  $\text{кг/м}^3$ ;

- 2) лобовий тиск повітряного потоку  $P$ :

$$P = k \cdot S_m \cdot \rho_{pac} \cdot U_{\phi}^2, \quad (3)$$

де  $k$  – коефіцієнт лобового опору середовища;  
 $S_m$  – площа міделевого перерізу насипаного матеріалу,  $m^2$ ;  
 $\rho_{ac}$  – густина агента сушіння,  $kg/m^3$ ;  
 $U_\phi$  – швидкість фільтрації,  $m/s$ .



1 – каскад; 2 – бункер

Рисунок 2 – Схема руху частинки на початковому етапі

Джерело розроблено авторами

Знайдемо рівняння руху по осях  $OX$  і  $OZ$ :

$$\begin{aligned}\Sigma X &= 0; \\ \Sigma Z &\geq P - G.\end{aligned}$$

Тоді для граничного значення рівноваги можна записати:

$$m_n \frac{d^2 z_0}{dt^2} = k S_m \rho_{ac} c^2 - m_n g, \quad (4)$$

або

$$\frac{d^2 z}{dt^2} = \frac{k S_m \rho_{ac} c^2 - m_n g}{m_n} \quad (5)$$

Звідси після інтегрувань та з урахуваннями початкових умов, у підсумку можна записати:

$$z_0 = \frac{1}{2} \left( \frac{k \cdot S_m \cdot \rho_{ac} \cdot c^2 - m_n g}{m_n} \right) \cdot t_0^2 + c_1 \cdot t + c_2. \quad (6)$$

Із рівняння 6, враховуючи початкові умови (рис. 3), визначаємо:  
 – прискорення

$$\frac{dU_{z1}}{dt} = \frac{k \cdot S_m \cdot \rho_{ac} \cdot C^2}{m_n} - g, \quad (7)$$

– швидкість

$$\int dU_{z1} = \int \left( \frac{k \cdot S_m \cdot \rho_{ac} \cdot C^2}{m_n} - g \right) dt$$

$$U_{z1} = \int_0^t \left( \frac{k \cdot S_m \cdot \rho_{ac} \cdot C^2}{m_n} - g \right) dt,$$

$$U_{z1} = \left( \frac{k \cdot S_m \cdot \rho_{ac} \cdot C^2}{m_n} - g \right) t \Big|_0^t + C_1,$$

де  $C_1 = U_{0z}$  – початкова швидкість під час відриву частинки:

$$U_{z1} = \left( \frac{k \cdot S_m \cdot \rho_{ac} \cdot C^2}{m_n} - g \right) \tau + U_{0z}, \quad (8)$$

– переміщення

$$\int_0^z dz_1 = \int_0^{\tau_1} \left[ \left( \frac{k \cdot S_m \cdot \rho_{ac} \cdot C^2}{m_n} - g \right) \tau + U_{0z} \right],$$

$$z_1 = \frac{1}{2} \left( \frac{k \cdot S_m \cdot \rho_{ac} \cdot C^2}{m_n} - g \right) \tau^2 \Big|_0^{\tau_1} + U_{0z} \tau \Big|_0^{\tau_1} + C_2, \quad (9)$$

$$z_1 = \frac{1}{2} \left( \frac{k \cdot S_m \cdot \rho_{ac} \cdot C^2}{m_n} - g \right) \tau^2 + U_{0z} \tau + C_2.$$

Згідно з представленими координатами (рис. 2) при  $\tau = 0$  і  $z = 0$ , тобто  $C_2 = 0$ .

Другим етапом руху частинки є її рух в киплячому шарі на похилому каскаді.

Частинку 1 (рис. 3) умовно приймаємо за "ведучу", а частинки 2, 3, 4 та 5 відносно до неї створюють проміжний шар. Під час переміщення киплячого сипучого матеріалу по поверхні каскаду, який пронизує агент сушіння, частинки проміжного шару "вклинюються" між "ведучим" та "веденим" шарами і розсовують їх [14].

У момент вклинювання частинки 1 між частинками 2, 3, 4, 5 сили реакцій  $R_{13}$ ,  $R_{23}$ ,  $R_{43}$ ,  $R_{53}$  відхиляються від нормалі на кут внутрішнього тертя  $\psi$  у бік збільшення кута укладки  $\beta$ , в результаті чого сили реакцій складають з нормаллю кут  $\gamma = \alpha + \beta + \psi$ .

На частинку 1 (рис. 3) діють такі сили:

- 1) гравітаційна  $G_n$ ;
- 2) лобовий тиск повітряного потоку  $P$ ;
- 3) нормальний тиск:

$$N_n = m_n \left( \frac{\rho_n}{\rho_{ac}} - 1 \right) g \cos \alpha; \quad (10)$$

- 4) тангенційна сила:

$$F = m_n \left( \frac{\rho_n}{\rho_{ac}} - 1 \right) g \sin \alpha; \quad (11)$$

- 5) сила взаємодії між частинками (сили реакції):

$$R_{13} = \frac{N_1}{\cos \gamma}, R_{23} = -\frac{N_2}{\cos \gamma}, R_{43} = \frac{P - N_4}{\cos \gamma}, R_{53} = \frac{P - N_5}{\cos \gamma}. \quad (12)$$

Складемо систему рівняння руху частинки 1 під дією прикладених до неї сил відносно осей координат XOZ:

$$\begin{aligned} m_n \frac{d^2 x}{d\tau^2} &= F + \cos \gamma (R_{43} - R_{23} - R_{13} + R_{53}); \\ m_n \frac{d^2 z}{d\tau^2} &= P - N_3 + \sin \gamma (R_{43} - R_{23} - R_{13} + R_{53}). \end{aligned} \quad (13)$$

Підставивши значення сил, що діють на частинку, та зробивши потрібні математичні перетворення, отримуємо:

$$\frac{m_n d^2 x}{d\tau^2} = F \pm (P - N_4 + N_2 - N_1 + P - N_5); \quad (14)$$

$$\frac{m_n d^2 z}{d\tau^2} = P - N_3 \pm (P - N_4 + N_2 - N_1 - P + N_5) \operatorname{tg} \gamma.$$

Після підстановок і перетворень отримаємо:

$$m_n \frac{d^2 x_2}{d\tau} = \frac{(P - N_3) \operatorname{ctg} \gamma + F}{\left( \frac{\rho_n}{\rho_{ac}} - 1 \right)},$$

$$m_n \frac{d^2 z_2}{d\tau} = \frac{(P - N_3) - F \operatorname{ctg} \gamma}{\left( \frac{\rho_n}{\rho_{ac}} - 1 \right)}.$$

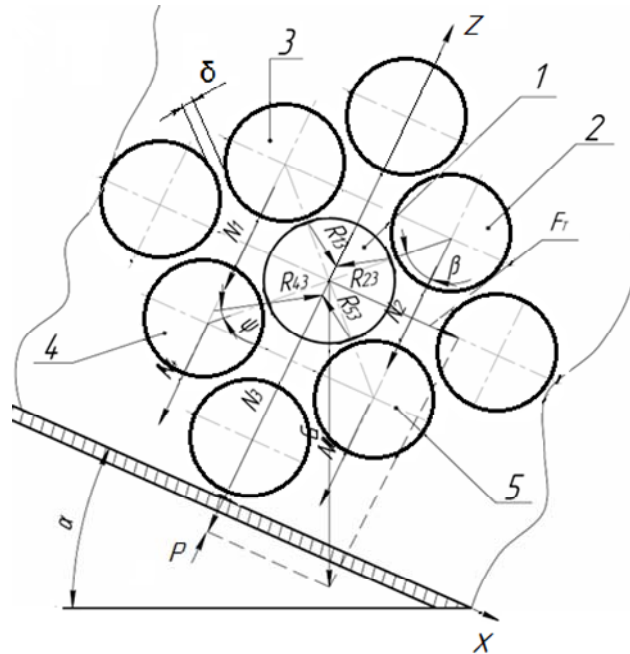


Рисунок 3 – Схема сил, які діють на частинку 1, що знаходиться в киплячому шарі наспного матеріалу на каскаді сушарки

*Джерело розроблено авторами*

Швидкість по координатних осях дорівнює:

$$dU_{x_2} = \frac{(P - N_3) \operatorname{ctg} \gamma}{\left( \frac{\rho_n}{\rho_{ac}} - 1 \right) m_n} d\tau, \quad (15)$$

$$dU_z = \frac{(P - N_3) - F \cdot \operatorname{ctg} \gamma}{\left( \frac{\rho_n}{\rho_{ac}} - 1 \right) m_n} d\tau. \quad (16)$$

Уводимо позначення  $A = \frac{(P - N_3) \operatorname{ctg} \gamma}{\left(\frac{\rho_u}{\rho_{ac}} - 1\right) m_u}$  і знаходимо швидкість по  $OX$ :

$$dU_{x_2} = A \cdot d\varphi,$$

$$U_{x_2} = A \int_0^{\varphi} d\varphi,$$

$$U_{x_2} = A\varphi \Big|_0^{\varphi},$$

$$U_{x_2} = A\varphi + C_3.$$

Аналогічно для швидкості по  $OY$  позначимо  $B = \frac{(P - N_3) - F \cdot \operatorname{ctg} \gamma}{\left(\frac{\rho_u}{\rho_{ac}} - 1\right) m_u}$ ,

$$dU = B \cdot d\varphi,$$

$$U_{z_2} = B\varphi + C_4,$$

$$C_4 = U_{z_1}.$$

Визначаємо траєкторії руху по координатних осях:

$$U_{x_2} = \frac{dx_2}{d\varphi} = (A\varphi + C_3),$$

але згідно з початковими умовами при  $\varphi = 0$ ,  $U_x = 0$  та  $U_{x_1} = 0$   $C_3 = 0$ , тоді:

$$dx_2 = A\varphi \cdot d\varphi.$$

Після вирішення рівняння отримаємо:

$$x_2 = \frac{1}{2} A\varphi^2 + C_5. \quad (17)$$

Аналогічно для

$$U_z = \frac{dz_2}{d\varphi} = B\varphi + C_4,$$

$$dz_2 = (B\varphi + C_4)d\varphi,$$

$$z_2 = \frac{1}{2} B\varphi^2 + C_4\varphi + C_5. \quad (18)$$

Підставляємо значення коефіцієнтів  $A$  та  $B$  і визначаємо в рівняння руху (17) та (18) отримуємо:

$$Z_2 = \frac{1}{2} \left[ \frac{(P - N_3) - F \cdot \operatorname{ctg} \gamma}{\left( \frac{\rho_n}{\rho_{ac}} - 1 \right) m_n} \right] \cdot \varphi^2 + U_{z1} \cdot \varphi; \quad (19)$$

$$X_2 = \frac{1}{2} \left[ \frac{(P - N_3) \cdot \operatorname{ctg} \gamma + F}{\left( \frac{\rho_n}{\rho_{ac}} - 1 \right) m_n} \right] \cdot \varphi^2 + X_1. \quad (20)$$

З рівнянь (19) та (20) знаходимо швидкості по координатних осях:

$$U_{z2} = \left[ \frac{(P - N_3) - F \cdot \operatorname{ctg} \gamma}{\left( \frac{\rho_n}{\rho_{ac}} - 1 \right) m_n} \right] \cdot \varphi + U_{z1}; \quad (21)$$

$$U_{x2} = \frac{(P - N_3) \cdot \operatorname{ctg} \gamma + F}{\left( \frac{\rho_n}{\rho_{ac}} - 1 \right) m_n} + U_{x1}. \quad (22)$$

З урахуванням того, що етапи руху частинок по каскадах і між ними повторюються, насамкінець отримаємо:

– по осі  $OZ$

швидкість 
$$U_{zia} = \left( \frac{k \cdot S_m \cdot \rho_{ac} \cdot c^2}{m_n} - g \right) \varphi + U_{z(i-1)}; \quad (23)$$

фаза "а":

переміщення 
$$Z_{ia} = \frac{1}{2} \left( \frac{k \cdot S_m \cdot \rho_{ac} \cdot c^2}{m_n} - g \right) \varphi^2 + U_{z(i-1)} \cdot \varphi; \quad (24)$$

швидкість 
$$U_{ziб} = \left[ \frac{(P - N_3) - F \cdot \operatorname{ctg} \gamma}{\left( \frac{\rho_n}{\rho_{ac}} - 1 \right) m_n} \right] \cdot \varphi + U_{zia}; \quad (25)$$

фаза "б":

переміщенн 
$$Z_{iб} = \frac{1}{2} \left[ \frac{(P - N_3) - F \cdot \operatorname{ctg} \gamma}{\left( \frac{\rho_n}{\rho_{ac}} - 1 \right) m_n} \right] \cdot \varphi^2 + U_{zia} \cdot \varphi; \quad (26)$$

по осі  $OX$

швидкість 
$$U_{zia} = 0; \quad (27)$$

фаза "а":



переміщення  $X_{ia} = 0;$  (28)

швидкість  $U_{xiб} = \left[ \frac{(P - N_3) \cdot ctg\gamma + F}{\left( \frac{\rho_n}{\rho_{ac}} - 1 \right) m_n} \right] \cdot t + U_{xa(i-1)} ;$  (29)

фаза "б":

переміщення  $X_{iб} = \frac{1}{2} \left[ \frac{(P - N_3) \cdot ctg\gamma + F}{\left( \frac{\rho_n}{\rho_{ac}} - 1 \right) m_n} \right] \cdot t^2 + X_{a(i-1)} .$  (30)

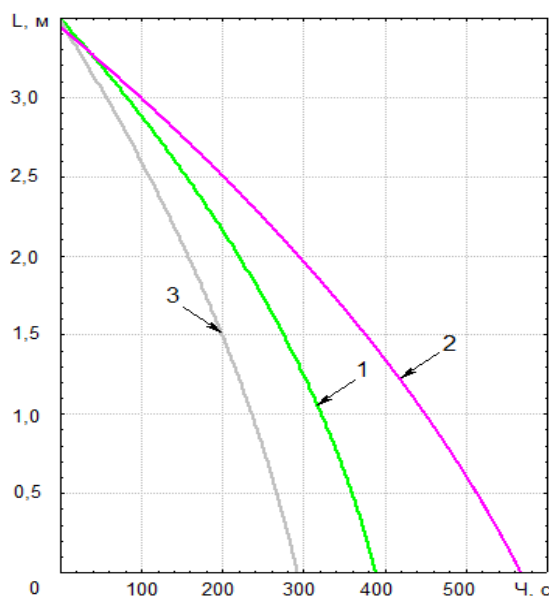


Рисунок 4 – Залежність переміщення частинки по осі OZ від часу (t) знаходження в сушильній камері

*Джерело розроблено авторами*

Графічні залежності переміщення частинок різних культур за час знаходження в сушильній камері (рис.4) побудовані на основі рівняння (29,30) при числових розрахунках, виконаних за допомогою пакету прикладних програм.

#### **Висновки.**

1. Для насипного матеріалу переміщення має нелінійний характер, прискорюючись зі збільшенням часу знаходження частинок в сушильній камері. Пояснити це можна домінуючою дією сили тяжіння над іншими силами, що діють на частинку у процесі сушіння.

2. Математично описано рух частинок по каскадах сушарки. Отримана модель переміщення матеріалу враховує вплив параметрів сушарки на рух частинок по кожному з каскадів під час процесу сушіння. Математична модель дозволяє аналітично встановити час знаходження частинок матеріалу в робочій камері сушіння, а отже теоретично визначити продуктивність агрегату.

3. Наявність похилих перфорованих каскадів у робочому просторі каскадної сушарки призводить до зменшення його площі вільного поперечного перерізу. Це

конструктивне рішення стає причиною місцевого збільшення швидкості і ступеню турбулізації потоку сушильного агента, а також зміни характеру розподілення швидкостей навколо полиці .

4. Для режиму киплячого шару характерно мінімально необхідний час контакту частинок з сушильним агентом, що обумовлюється достатньо значною швидкістю руху частинок. Тому процес сушіння в даному режимі на поверхні каскаду лімітується не гідродинамічними умовами, а довжиною каскаду, по поверхні якої частинки рухаються достатньо швидко з мінімальним часом перебування. Останній дещо збільшиться в зоні накопичення частинок у вигляді шару на стінці апарата, у результаті чого маємо більш ефективний контакт фаз і, відповідно, більш інтенсивне вологовідведення від частинок сушильним агентом саме у цій зоні.

5. Зростання швидкості сушильного агента спричиняє посилення його аеродинамічної дії на шар матеріалу, створюються умови для режиму киплячого шару на поверхні перфорованого каскаду і біля стінки апарата у зоні розвантажувального зазору. Також збільшенню вологовіддачі від частинок матеріалу в режимі киплячого шару сприяє збільшення часу перебування частинок за рахунок їх масової циркуляції в зоні над розвантажувальним простором.

## Список літератури

1. Гідродинаміка при сушінні нерівномірного нерухомого шару дисперсного матеріалу / Я. М. Ханик, Г. О. Мазяр, І. О. Гузьова, Я. Д. Ярош . *Науковий вісник НЛТУ України*. 2008. Вип. 18.3. С. 104–107.
2. Шандиба Н., Юхименко М. Методика рекурентного розрахунку поличної гравітаційної сушарки сипких матеріалів . *Тринадцята наукова конференція «Львівські хімічні читання – 2011»*. Львів, 2011. С. У39.
3. Федяев А.А. Федяева В.Н., Видин Ю.В. Математическое моделирование динамики процессов тепловлажностной обработки капиллярно-пористых коллоидных дискретных материалов . *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*. 2008. Ч. 1. С. 68–75.
4. Шрайбер А.А., Милютин В.Н., Яценко В.П. Гидромеханика двухкомпонентных потоков с твёрдым поли- дисперсным веществом . К.: Наукова думка, 1980. 252 с.
5. Шандиба О.Б., Артюхова Н.О. Оптимізація технологічних характеристик багатоступеневої гравітаційної сушарки . *VIII Міжнародна науково-практична конференція «Екологічна безпека: проблеми і шляхи вирішення»*. Алушта, 2012. Т. 2. С. 282–285.
6. Осадчий С.І., Скриннік М.О., Скриннік І.О. Зерносушильна установка з киплячим шаром для сушіння зернових як об'єкт автоматизації . *Техніка в сільськогосподарському машинобудуванні, галузеве машинобудування, автоматизація : зб. наук. праць Кіровоградського нац. техн. ун-ту.*, 2006. Вип. 17. С. 61 – 66.
7. Осадчий С.І., Калита М.О., Скриннік І.О. Визначення структури і параметрів математичної моделі зерносушильної установки з киплячим шаром у реальних експлуатаційних умовах . *Вісник Харківського національного технічного університету: наук. журнал*. 2008. Вип. 73, т. 2. С. 43 – 45.
8. Осадчий С.І., Скриннік М.О., Скриннік І.О. Ідентифікація сигналів зерносушильної установки з киплячим шаром в реальних експлуатаційних умовах . *Вісник Хмельницького національного технічного університету: наук. журнал*. 2007. Вип. 3, т. 1. С. 38 – 41.
9. Панасюк С.Г., Дідух В.Ф., Голячук С.Є. Енергозберігаюча технологія сушіння кукурудзи в качанах . *Вісник аграрної науки Причорномор'я*. 2002. Вип. 4, т.1. С. 165 – 168.
10. Зерносушильна установка касетного типу: пат. UA 10346 U Україна: №U 200503610; заяв. 18.04.2005; опубл. 15.11.2005. Бюл. № 11. 4 с.
11. Петренко М.М., Скриннік І.О. Зерносушильна установка касетного типу для сушіння зернових культур . *Техніка в сільськогосподарському машинобудуванні, галузеве машинобудування, автоматизація : зб. наук. праць Кіровоградського нац. техн. ун-ту*. 2004. Вип. 15. С. 318 – 323.
12. Експериментальні дослідження впливу параметрів зерносушарки каскадного типу на показники її роботи / М.М. Петренко та ін. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин: загальнодерж. міжвід. наук.-техн. зб.* 2006. Вип. 36. С. 29 – 34.

13. Детермінована математична модель руху насіння по каскадах зерносушарки каскадного типу / М.М. Петренко та ін. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин. загальнодерж.міжвід.наук.-техн. зб.* 2007. Вип. 37. С. 299 – 304.
14. Результати експериментальних досліджень впливу основних параметрів на процес сушіння зернових культур у зерносушарці каскадного типу / М.М. Петренко та ін. *Вісник Тернопільського державного технічного університету.* 2007. Вип. 3, том 12. С. 53 – 59.
15. Петренко М.М., Скриннік І.О., Богатирьов Д.В. Визначення швидкості фільтрації та гідравлічного опору на каскадах сіток зерносушарки касетного типу . *Праці. Таврійська державна агротехнічна академія.* 2005. Вип. 34. С. 160 – 165.
16. Модель переносу тепла в зерносушарці каскадного типу від каскаду до шару насіння / М.М. Петренко та ін. *Техніка в сільськогосподарському машинобудуванні, галузеве машинобудування, автоматизація : зб. наук. праць Кіровоградського нац. техн. ун-ту.* 2008. Вип. 20. С. 293 – 298.
17. Модель зміни шпаруватості псевдо розрідження шару насіння на каскадах зерносушарки / М.М. Петренко та ін. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин. загальнодерж.міжвід.наук.-техн. зб.* 2008. Вип. 38. С. 258 – 264.
18. Перспективи комерціалізації наукових розробок у сільському господарстві. Тези доповідей НПС Волинської облдержадміністрації. Луцьк, 2002. 43 с.

## References

1. Khanyk, Ya.M., Maziar, H.O., Huzova, I.O. & Yarosh, Ya.D. (2008). Hidrodynamika pry sushinni nerivnomirnogo nerukhomoho sharu dycpersnoho materialu [Hydrodynamics during drying of a non-uniform stationary layer of dispersed material]. *Naukovyi visnyk NLTU Ukrainy – Scientific bulletin of NLTU of Ukraine., Issue 18.3*, 104–107 [in Ukrainian].
2. Shandyba, N. & Yukhymenko, M. (2011). Metodyka rekurentnoho rozrakhunku polychnoi hравitatsiinoi susharky sypykhn materialiv [The method of recurrent calculation of the shelf gravity dryer of loose materials]. *Lviv chemical readings: Trynadtsiata naukova konferentsiia (2011 r.) – Thirteenth scientific conference (p.39)*, Lviv [in Ukrainian].
3. Fediaev Aleksandr A., Valentyna N. Fediaeva, Yuryi V. Vydyn (2008). Matematycheskoe modelyrovanye dynamyky protsessov teplovlazhnostnoi obrabotky kapyliarno-porystykh kolloidnykh dyskretnykh materyalov [Mathematical modeling of the dynamics of the processes of heat and moisture treatment of capillary-porous colloidal discrete materials] . *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies, Part. 1*, 68–75.
4. Shraiber, A.A., Myliutyn, V.N. & Yatsenko, V.P. (1980). *Hydromekhanika dvukhkompnentnykh potokov s tvrdym poly- dyspersnym veshchestvom [Hydromechanics of two-component flows with a solid polydisperse substance]* . Kiev: Naukova dumka [in Russian].
5. Shandyba O.B. & Artiukhova N. O. (2012). Optymizatsiia tekhnolohichnykh kharakterystyk bahatostupenevoi hравitatsiinoi susharky [Optimization of the technological characteristics of a multi-stage gravity dryer]. *Environmental safety: problems and solutions: VIII Mizhnarodna naukovopraktychna konferentsiia (Alushta) – VIII International Scientific and Practical Conference (Vol. 2. pp. 282–285)* [in Ukrainian].
6. Osadchyi, S.I., Skrynnik, M.O. & Skrynnik, I.O. 2006. Zernosushylna ustanovka z kypliachym sharom dlia sushinnia zernovykh yak ob'ekt avtomatyzatsii [A fluidized bed grain drying unit for grain drying as an object of automation]. *Tekhnika v silskohospodarskomu mashynobuduvanni, haluzeve mashynobuduvannia, avtomatyzatsiia ; zb. nauk. prats Kirovohradskoho nats. tekhn. un-tu – Techniques in agricultural engineering, industrial engineering, automation: coll. of science works of the KNTU, Issue 17*, 61 – 66. [in Ukrainian].
7. Osadchyi, S.I., Kalyta, M.O. & Skrynnik, I.O. (2008). Vyznachennia struktury i parametriv [Determination of the structure and parameters of the mathematical model of the grain drying unit with a fluidized bed in real operating conditions] . *Visnyk Kharkivskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu: Naukovyi zhurnal – Bulletin of the Kharkiv National Technical University: Science. magazine, Issu 73, Vol. 2*, 43 – 45 [in Ukrainian].
8. Osadchyi, S.I., Skrynnik, M.O. & Skrynnik, I.O. (2007). Identyfikatsiia syhnaliv zernosushylnoi ustanovky z kypliachym sharom v realnykh ekspluatatsiinykh umovakh [Identification of fluidized bed grain dryer signals in real operating conditions]. *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu: Naukovyi zhurnal – Bulletin of the Khmelnytskyi National Technical University: Sci. magazine, Issue 3, Vol. 1*, 38 – 41 [in Ukrainian].
9. Panasiuk, S.H., Didukh, V.F. & Holiachuk, S.Ie. (2002). Enerhozberihaiucha tekhnolohiia sushinnia kukurudzy v kachanakh [Energy-saving technology of drying corn in cobs]. *Visnyk ahrarnoi nauky*

- Prychornomoria – Herald of Agrarian Science of the Black Sea Region, Issue 4, Vol.1, 165 – 168 [in Ukrainian].*
10. Pat. UA 10346 U Ukraina. Zernosushylna ustanovka kasetnoho typu [Cassette-type grain dryer] . No. u200503610; stated. April 18, 2005; has been published November 15, 2005, Bul. No. 11. 4 s.
  11. Petrenko, M.M. & Skrynnik, I.O. (2004). Zernosushylna ustanovka kasetnoho typu dlia sushinnia zernovykh kultur [Cassette-type grain dryer for drying grain crops] . *Tekhnika v silskohospodarskomu mashynobuduvanni, haluzeve mashynobuduvannia, avtomatyzatsiia ; zb. nauk. prats Kirovohradskoho nats. tekhn. un-tu – Techniques in agricultural engineering, industrial engineering, automation: coll. of science works of the KNTU, Issue 15, 318 – 323 [in Ukrainian].*
  12. Petrenko, M.M., Skrynnik, I.O., Bohatyrov, D.V. et al. (2006). Eksperymentalni doslidzhennia vplyvu parametriv zernosusharky kaskadnoho typu na pokaznyky yii roboty [Experimental studies of the influence of the parameters of the cascade type grain dryer on its performance] . *Konstruivannja, vyrobnyctvo ta ekspluatacija sil's'kohospodars'kyx mashyn – Design, manufacture and operation of agricultural machinery, Issue 36, 29 – 34 [in Ukrainian].*
  13. Petrenko, M.M., Skrynnik, I.O., Bohatyrov, D.V. et al. (2007). Determinovana matematychna model rukhu nasinnia po kaskadakh zernosusharky kaskadnoho typu [A deterministic mathematical model of seed movement along the cascades of a cascade-type grain dryer] . *Konstruivannja, vyrobnyctvo ta ekspluatacija sil's'kohospodars'kyx mashyn – Design, manufacture and operation of agricultural machinery, Issue 37, 299 – 304 [in Ukrainian].*
  14. Petrenko M.M., Skrynnik I.O., Bohatyrov D.V. et al. (2007). Rezultaty eksperymentalnykh doslidzen vplyvu osnovnykh parametriv na protses sushinnia zernovykh kultur u zernosushartsi kaskadnoho typu [The results of experimental studies of the influence of the main parameters on the drying process of grain crops in a cascade type grain dryer]. *Visnyk Ternopil'skoho derzhavnogo tekhnichnogo universytetu – Bulletin of the Ternopil State Technical University, Issue. 3, Vol. 12, 53 – 59 [in Ukrainian].*
  15. Petrenko, M.M., Skrynnik, I.O. & Bohatyrov, D.V. (2005). Vyznachennia shvydkosti filtratsii ta hidravlichnogo oporu na kaskadakh sitok zernosusharky kasetnoho typu [Determination of filtration speed and hydraulic resistance on cascades of grain dryer nets of the cassette type]. *Pratsi. Tavriiska derzhavna ahrotekhnichna akademiia – Works Tavri State Agricultural Technical Academy, Issue 34, 160 – 165 [in Ukrainian].*
  16. Petrenko, M.M., Sabirzianov, T.H., Skrynnik, I.O. et al. (2008). Model perenosu tepla v zernosushartsi kaskadnoho typu vid kaskadu do sharu nasinnia [A model of heat transfer in a cascade-type grain dryer from the cascade to the seed layer]. *Tekhnika v silskohospodarskomu mashynobuduvanni, haluzeve mashynobuduvannia, avtomatyzatsiia ; zb. nauk. prats Kirovohradskoho nats. tekhn. un-tu – Techniques in agricultural engineering, industrial engineering, automation: coll. of science works of the KNTU, Issue 20, 293 – 298 [in Ukrainian].*
  17. Petrenko M.M., Skrynnik I.O., Skrynnik M.O. et al. (2008). Model zminy shparuvatosti psevido rozridzhennia sharu nasinnia na kaskadakh zernosusharky [A model of the change in the porosity of the pseudo rarefaction of the seed layer on the cascades of the grain dryer] . *Konstruivannja, vyrobnyctvo ta ekspluatacija sil's'kohospodars'kyx mashyn – Design, manufacture and operation of agricultural machinery, Issue 38, 258 – 264 [in Ukrainian].*
  18. *Perspektyvy komertsializatsii naukovykh rozrobok u silskomu hospodarstvi [Prospects of commercialization of scientific developments in agriculture].* (2002). Tezy dopovidei NPS Volynskoi obldzhadministratsii. Lutsk [in Ukrainian].

**Ivan Skrynnik**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Marianna Fedotova**, PhD tech. sci., **Viktor Darienko**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.

*Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine*

### **Theoretical Studies of the Process of Movement of Bulk Building Materials During Drying in the Fluidized Bed of a Cascade Dryer in Construction**

The paper considers the system of equations of movement of the material flow, which allows to determine the speed, trajectory of movement of particles, as well as the time of stay of particles in the free working space of the apparatus.

Not only the hydrodynamics of flows, but also the kinetics of the drying process in fluidized bed devices (the particle changes its mass during drying, which is reflected in the mode of its movement) has a significant influence on the determination of the required residence time of the particles in the apparatus, which has contact actions with the cascade. A promising way to reduce material and energy costs during heat and mass exchange processes in a fluidized bed is the use of multi-stage countercurrent contact of the liquefying agent and the dispersed phase. Such processes are implemented in cascade-type devices. It should be noted that the analytical dependences presented do not yet allow a reliable description of the hydrodynamics of the movement

of solid particles in a device with contact devices. This is due to the fact that the proposed analytical regularities do not take into account the influence of the main design parameters of the cascade contacts on the time the particles stay in the working space of the device. The efficiency of drying devices for drying materials in a fluidized bed largely depends on the flow field of the gas flow, the distribution of which in the working space of the device affects the profile of temperatures and concentrations of the dispersed (solid) phase in the gas flow.

Determination of gas flow velocity fields in the working space of the fluidized bed apparatus in combination with calculations of the rate of transition of a dense layer of material into a fluidized state, conditions of expansion of the material layer, operating parameters of fluidization, and conditions of removal of material from the apparatus allows for optimal selection of the design characteristics of this type of apparatus. Consideration of the nature of the movement of the gas flow is important for establishing the regularities of its interaction with the solid phase. Determining the hydrodynamic conditions of flow movement makes it possible to mathematically describe the speed and residence time of solid particles in the apparatus.

**cascade dryer, fluidized bed, solid phase, material drying, moisture reservoir, drying time, fluidization, contact time**

*Одержано (Received) 22.11.2022*

*Прорецензовано (Reviewed) 02.12.2022*

*Прийнято до друку (Approved) 29.12.2022*

**УДК 691.615.1**

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.6\(37\).2.120-126](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.6(37).2.120-126)

**Г.Д. Портнов**, доц., канд. техн. наук, **В.В. Дарієнко**, доц., канд. техн. наук,

**В.В. Пукалов**, доц., канд. техн. наук

*Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна*

*e-mail: budkom999@gmail.com*

## Модель стенда для дослідження конструкцій з ЛИСТОВОГО СКЛА

В даній роботі представлена розроблена в середовищі SOLIDWORKS модель стенда для дослідження конструкцій з листового скла під дією рівномірно розподіленого тиску. Дослідження моделі в модулі SOLIDWORKS Simulation за запропонованими налаштуваннями дозволяє дослідити напружений стан листового скла в залежності від параметрів гумової прокладки і обґрунтувати конструкцію супорта. Модель дозволяє оцінити напружено – деформований стан елементів конструкції на основі критерія руйнування Мора – Кулона (для скляної пластини), напружень (за Мизесом та інших) для елементів супорта. Приведені налаштування програми забезпечують її безконфліктну роботу з невеликими витратами машинного ресурсу. Є можливість варіацій конструкції супорта, включаючи врахування умов закріплення (тертя) елементів. Локалізація критичних напружень в скляній пластині співпадає з даними натурних експериментів, що говорить об адекватності моделі. Розроблена модель стенду дозволяє дослідити напружений стан листового скла в умовах рівномірного навантаження в залежності від параметрів гумової прокладки і обґрунтувати конструкцію супорта.

**листова скла, супорт, 3D моделювання, критерії руйнування, напруження Мора – Кулона**

**Постановка проблеми.** Сучасні архітектурні рішення передбачають застосування листового скла як конструктивного матеріалу, здатного сприймати значні навантаження. При розрахунках на міцність існуючі нормативні документи, такі як ГОСТ Р 56926-2016 та EN 12150-2, передбачають, переважно, вітрові навантаження на поверхню скляної пластини.

© Г.Д. Портнов, В.В. Дарієнко, В.В. Пукалов, 2022