

УДК 621.867.47

**ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ БОКОВОГО ВИСИПАННЯ СИПКИХ
МАТЕРІАЛІВ З БУНКЕРА**

Р. І. Козачук

студент 2 курсу, групи МБо – 21 інт., навчально-науковий механічний інститут
Науковий керівник – к.т.н., асистент Д. Л. Серілко

*Національний університет водного господарства та природокористування,
м. Рівне, Україна*

В статті проведено експериментальні дослідження бокового висипання сипких матеріалів з бункера, що використовується в машинах для формування бетонної суміші.

Ключові слова: бункер, витікання, сипкий матеріал, рівняння регресії.

В статье проведены экспериментальные исследования бокового высыпания сыпучих материалов из бункера, который используется в машинах для формирования бетонной смеси.

Ключевые слова: бункер, утечки, сыпучий материал, уравнения регрессии.

In article the experimental study of lateral eruptions of bulk materials from the hopper used in machines for forming concrete.

Keywords: bunker, outflow, loose material, the regression equation.

Постановка проблеми. Питанням витікання (висипання) сипких матеріалів з бункерів займалися багато дослідників [1-4], однак ця проблема в даний час залишається ще не вирішеною. Це пов'язано з недостатнім вивченням фізичних процесів витікання сипкого вантажу з бункера на мікрорівні, тобто на рівні взаємодії частинок.

Метою статті є дослідження процесу висипання сипкого матеріалу із бункера.

Викладення основного матеріалу. Вивчення процесів руху сипучого вантажу, що відбуваються на мікрорівні, дозволяє встановити структурно-механічний стан, в якому знаходиться дисперсне середовище, а отже, встановити зв'язок між процесами, що відбуваються на мікрорівні, з процесами, що відбуваються на макрорівні. Іншими словами, розробити математичну модель руху дисперсного (зокрема, сипкого) середовища, як модель механіки суцільного середовища [5].

У літературі такі моделі механіки суцільного середовища називаються реологічними моделями дисперсних середовищ [5].

Дослідження показали, що за певних умов сипучий вантаж при русі може знаходитися в трьох структурно-механічних станах: твердого тіла, пластичного і вільнодисперсного [6].

При цьому, якщо сипкий вантаж знаходиться у твердому стані, то його частинки пов'язані між собою, їх взаємне переміщення відсутнє і для внутрішніх напружень справедливий закон Гука; якщо насипний вантаж знаходиться в пластичному стані (повільний рух), то для внутрішніх напружень справедливий закон Кулона; при вільнодисперсному стані (швидкий рух) частинки насипного вантажу не пов'язані між собою, перебувають у безперервному хаотичному русі і взаємодіють між собою в результаті зіткнень (ударів).

Твердий стан насипного вантажу описується рівняннями теорії пружності, пластичний стан – рівняннями руху сипкого середовища, що знаходиться в граничному стані. Вільнодисперсний стан насипного вантажу описується рівнянням Нав'є – Стокса для в'язкої рідини. При цьому замість коефіцієнта молекулярної в'язкості вводиться коефіцієнт

макров'язкості, який характеризує перенесення кількості руху в результаті випадкового зіткнення частинок насипного вантажу [1].

Отже, для теоретичного визначення витрати сипкого матеріалу, при його боковому витіканні з бункера, в зв'язку із складними аналітичними виразами, необхідно проводити громіздкі обрахунки. Тому ефективніше використовувати спрощені наближені емпіричні формули, які отримані на основі проведених експериментальних досліджень.

Для визначення витрати сипкого матеріалу при боковому витіканні із бункера розроблено експериментальну установку з плоским прозорим бункером (рис. 1).



Рис. 1. Витікання піску із плоскої моделі бункера

Особливістю устаткування є можливість зміни параметрів бункера:

а) ширини бункера (a); б) довжини вивантажувального патрубку (b); в) висоти вивантажувального патрубку (h); г) кута нахилу стінки бункера (α).

Ці параметри є змінними в межах $a=100 - 250$ мм, $h=40 - 80$ мм, $b=25-35$ мм, $\alpha=0 - 45^\circ$.

У процесі експериментальних досліджень проводили фото- та відеозйомку процесу витікання сипкого матеріалу з бункера та вимірювання витрати при різних геометричних параметрах.

У плоскій моделі бункера було проведено ряд експериментів із різними параметрами бункера і досліджено вплив геометричних параметрів бункера на витрату матеріалу рис. 2.

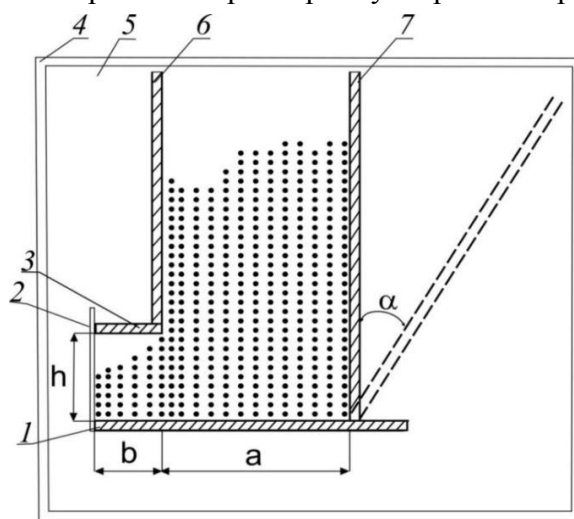


Рис. 2. Схема установки для дослідження бокового витікання сипкого матеріалу із бункера:

- 1 – дно бункера; 2 – шибер; 3 – вивантажувальний патрубок; 4 – основа;
- 5 – прозора стінка із органічного скла для проведення спостережень;
- 6 – стінка-кожух бункера; 7 – бокова стінка бункера

З метою визначення швидкості витікання вантажу з бункера було поставлено та реалізовано чотирьохфакторний експеримент за ортогональним планом другого порядку.

Етапами планування і проведення експерименту є: кодування факторів, складання матриць експерименту, рандомізація дослідів; вибір кількості повторюваності дослідів у кожній точці; перевірка відтвореності дослідів, перевірка адекватності моделі, оцінка значущості коефіцієнтів регресії.

Планування експерименту проводили в кодованих факторах x_i , в яких повне квадратне рівняння чотирьохфакторного експерименту має вигляд [7]:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_4 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{14}x_1x_4 + b_{23}x_2x_3 + b_{24}x_2x_4 + b_{34}x_3x_4 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{33}x_3^2 + b_{44}x_4^2. \quad (1)$$

Для ортогонального плану другого порядку рівняння (1) запишемо у вигляді:

$$\begin{aligned} \tilde{y} &= b_0^*x_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_4 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{14}x_1x_4 + \\ &+ b_{23}x_2x_3 + b_{24}x_2x_4 + b_{34}x_3x_4 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{33}x_3^2 + b_{44}x_4^2 = \\ &= b_0^*x_0 + \sum_{i=1}^{k=2} b_i x_i + \sum_{j=1}^{k-1=1} \sum_{i=j+1}^{k=2} b_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^{k=2} b_{ii} x_i^*, \end{aligned} \quad (2)$$

Дисперсія, що характеризує розсіювання результатів в u -му досліді

$$S_u^2 = \frac{1}{m_0 - 1} \sum_{i_k=1}^{m_0} (y_{ui_k} - \bar{y}_u)^2, \quad (3)$$

Коефіцієнти регресії визначають за залежністю

$$b_i = \frac{\sum_{u=1}^N \bar{y}_u x_{iu}}{\sum_{u=1}^N x_{iu}^2}, b_{ij} = \frac{\sum_{u=1}^N \bar{y}_u x_{iu} x_{ju}}{\sum_{u=1}^N (x_{iu} x_{ju})^2}, b_{ii} = \frac{\sum_{u=1}^N \bar{y}_u x_{iu}^*}{\sum_{u=1}^N (x_{iu}^*)^2}, b_0^* = \frac{\sum_{u=1}^N \bar{y}_u x_{0u}}{\sum_{u=1}^N x_{0u}^2}, x_{iu}^* = x_{iu}^2 - \beta_0. \quad (4)$$

За критерієм Кохрена проведено оцінку відтворюваності для перевірки гіпотези про однорідність дисперсій:

$$G = \frac{S_{u \max}^2}{\sum_{u=1}^N S_u^2} < G_{\max}(\alpha; f, N). \quad (5)$$

За критерієм Фішера проведено перевірку адекватності рівняння. Адекватність справджується, якщо виконується нерівність

$$F = \frac{S_{ad}^2}{S_y^2} < F(\alpha; f_{ad}; f_y). \quad (6)$$

За критерієм Стюдента визначена значущість коефіцієнтів регресії. Коефіцієнт вважається значимим, якщо виконується умова

$$|b_a| \geq \Delta b_a = t(0,05; f_y) \frac{S_y}{\sqrt{n}}. \quad (7)$$

Під час проведення експерименту ми отримали регресійну залежність, яка адекватно відтворює взаємозв'язок між функцією і параметрами моделі.

$$\begin{aligned} Q = F(x_1, x_2, x_3, x_4) &= 128,61 - 17,932 x_1 - 1,971 x_2 + 3,871 x_3 + 78,745 x_4 \\ &+ 3,327 x_1 x_2 - 1,395 b_{13} x_1 x_3 - 6,638 x_1 x_4 - 3,238 x_2 x_3 - 3,716 x_2 x_4 + 4,263 x_3 x_4 \\ &- 0,411 x_1^2 + 3,838 x_2^2 - 2,168 x_3^2 + 13,322 x_4^2. \end{aligned} \quad (8)$$

При переході до натуральних змінних отримано рівняння регресії, за допомогою якого ми отримуємо результати експерименту:

$$Q = F(b, a, \alpha, h) = 107,0726 - 2,1052b + 0,2254a + 0,6129\alpha + 1,7212h - 0,0072ba + 0,0124b\alpha - 0,0664bh + 0,0029a\alpha + 0,0078ah + 0,0095\alpha h + 0,0164b^2 + 0,0015a^2 + 0,0024\alpha^2 + 0,0333h^2, \quad (9)$$

де b – довжина патрубку, мм; a – ширина бункера, мм; α – кут нахилу стінки бункера, град; h – висота патрубку, мм.

Використовуючи отримане рівняння регресії залежно від параметрів, згідно яких проводили експериментальні дослідження, побудуємо графіки, що характеризують цей вплив на процес витікання сипких матеріалів.

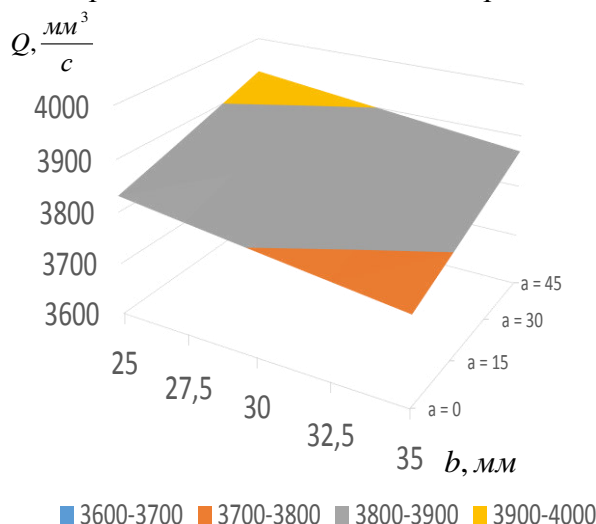


Рис. 3. Витрата бокового витікання сипкого матеріалу в залежності від довжини патрубку b та кута нахилу стінки бункера α , при сталих значеннях $a = 200$ мм і $h = 60$ мм

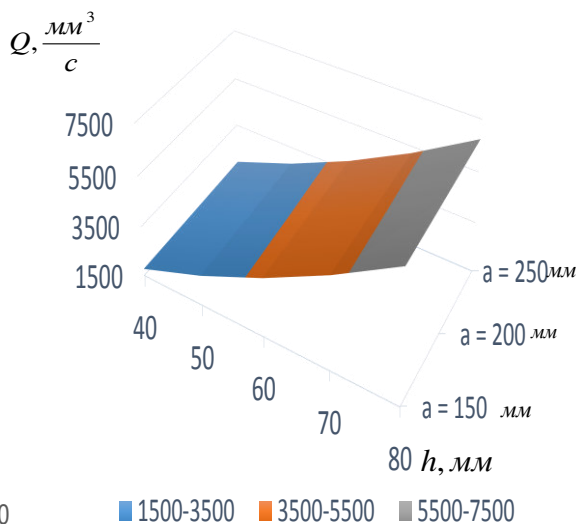


Рис. 4. Витрата бокового витікання сипкого матеріалу в залежності від ширини бункера a та висоти патрубку h при сталих значеннях $b = 30$ мм і $\alpha = 20^\circ$

Висновки:

1. При витіканні сипкого матеріалу із бункера він може знаходитися у трьох структурно-механічних станах: твердого тіла, пластичному та вільнодисперсному. Оскільки кожен такий стан описується різними рівняннями, розв'язання яких пов'язано із значними математичними труднощами, то ефективніше проводити дослідження експериментальним шляхом, щоб отримати емпіричні формули, які адекватно описують процес витікання у вибраній зоні змінних параметрів бункера.

2. Результати експериментальних досліджень показали, що витрата бокового витікання сипкого матеріалу залежить від висоти і довжини вивантажувального патрубку для даного сипкого матеріалу.

3. Якщо висота засипки в 5-8 разів вища за висоту вивантажувального отвору, то її висота практично не впливає на інтенсивність процесу витікання сипкого матеріалу.

Список використаних джерел:

1. Лукьянов И. И. Аппараты с движущимся зернистым слоем. Теория и расчет / И. И. Лукьянов – М. : Машиностроение, 1974. – 184 с.
2. Зенков Р. Л. Механика насыпных грузов / Р. Л. Зенков – М. : Машиностроение, 1964. – 251 с.
3. Кирия Р. В. Описание процесса истечения сыпучего груза из бункера с помощью структурно-механических моделей / Р. В. Кирия. – Системные технологии. – 2009. – С. 3-9.
4. Генералов М. Б. Истечение сыпучих материалов из аппаратов / М. Б. Генералов // Теор. основы хим. технол. – 1985. – Т. 19. – С. 53-58.
5. Овчинников П. Ф. Виброреология / П. Ф. Овчинников – Киев : Наук. думка, 1983. – 272 с.
6. Кирия Р. В. Кинетический подход к выводу уравнений движения сыпучих сред // Вісник Дніпропетровського державного університету : механіка. – Дніпропетровск : ДГУ, 1999. – Вып. 2. – С. 143-150.
7. Сиденко В. М. Основы научных исследований / В. М. Сиденко, И. М. Грушко – Харьков : Вища школа, 1976. – 200 с.