

Коваленко І. В.,  
Янцибаєв Д. С.

## МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ДОЗУВАННЯ СИПКОГО МАТЕРІАЛУ

Проведено математичне моделювання процесу переміщення сипкого матеріалу з бункера лінійного вагового дозатора на приймальний робочий орган живильника. Розглянуті 5 характерних зон структурно-механічного стану сипкого матеріалу під час його зсипання з випускного каналу у боковій частині бункера. Виведена формула, яка описує швидкість зсипання матеріалу. Проведено моделювання графіку зміни інтенсивності переміщення сипкого матеріалу за допомогою програмного забезпечення MATLAB.

**Ключові слова:** дозування, сипкий матеріал, лінійний ваговий дозатор, зсипання, інтенсивність, точність, MATLAB.

### 1. Вступ

Робота присвячена актуальній проблемі зменшення похибки при дозуванні сипких матеріалів, що дозволить зменшити затрати і збільшити якість виробленої продукції.

Поліпшення точності дозування сипких матеріалів — це одна з найважливіших задач, вирішення якої дозволить зменшити ризики як виробника, так і кінцевого споживача виробленої продукції. Для розв'язання такого завдання необхідно провести комплексне дослідження метрологічних характеристик дозуючого пристрою, шляхи підвищення точності і продуктивності для різних видів сипких матеріалів, проаналізувати їх фізико-механічні характеристики [1–3].

На сьогоднішній день, на лініях для пакування сипких матеріалів, переважно використовуються лінійні вагові дозатори. Такої популярності вони набули тому, що мають оптимальне співвідношення між продуктивністю, точністю дозування та вартістю.

У загальному випадку, будову лінійного вагового дозатора для сипких матеріалів (рис. 1), можна описати, як сукупність елементів, кожний з яких виконує окремі функції під час процесу дозування.

Сипкий матеріал дискретно або безперервно подається до приймального бункера 1, звідки проходить через випускну заслінку 2, висипається на стрічковий живильник 3 і далі рухається до зважувальної ємності 4, де проходить дозування необхідної кількості матеріалу. Вагу матеріалу, що заміряється датчиком 5, можна змінювати за допомогою контролера системи керування 6. Коли маса дозованого матеріалу наближується до заданої величини, система керування 7 автоматично змінює режим транспортної системи на повільну контрольовану подачу, та за умови досягнення відповідного значення дози — остаточно зупиняє транспортну систему.

Усі елементи будови лінійного вагового дозатора для сипких матеріалів, які виконують окремі функції (збирання, дозування, живлення), та режими роботи живильника, впливають на характеристики пакувальної лінії — точність та продуктивність дозування.

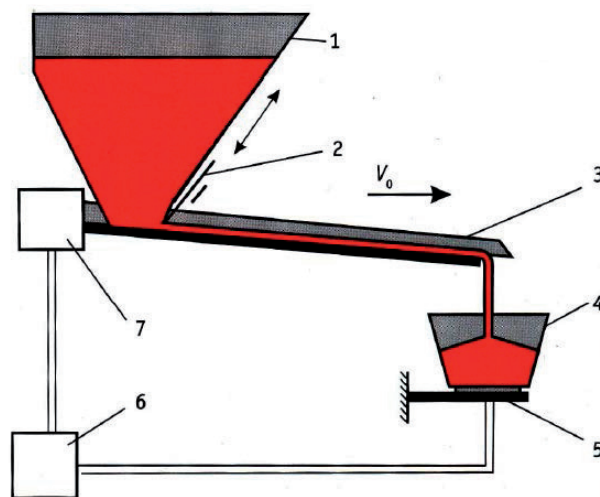


Рис. 1. Загальна будова лінійного вагового дозатора для сипких матеріалів

### 2. Аналіз літературних даних

Овчаренко А. І. у наукових статтях [4, 5] виділяє такі три типи похибок (джерела похибок дозування): — дрейфова — обумовлюється пусковими режимами лінійного вагового дозатора. Мінімального значення набуває, якщо ввести затримку між вмиканням та початком дозування сипкого матеріалу; — статична — характеризується неточністю виконання конструктивних елементів, таких як: зважувальна система, випускна заслінка тощо. Такий тип похибки складає не більше десятої частини відсотка похибки дозування; — динамічна — виникає при перехідних процесах в тензодатчиках, коли відбувається зсипання матеріалу у зважувальну ємність. Для того, щоб її зменшити необхідні додаткові часові та фінансові витрати (наприклад, встановити фільтри, які запрограмовані на визначення середнього значення ваги). Але це також зменшить продуктивність дозатора. Динамічна похибка поділяється на власну та режимну. Власна похибка характеризується фізико-механічними

властивостями сипких матеріалів та їх взаємодію з робочими елементами дозатора. Зменшити її майже неможливо, а тому основна складова похибки, яка регулюється — режимна. Режимна похибка залежить від таких факторів дозування, як: площа перерізу випускного каналу бункера, інтенсивності руху матеріалу тощо.

Слід зазначити, між точністю дозування сипких матеріалів та продуктивністю дозатора існує функціональна залежність. Точність дозування знизиться, якщо підвищити продуктивність, збільшивши: швидкість зсипання матеріалу за випускного каналу бункера, швидкість руху матеріалу на живильнику, шар матеріалу на робочому органу живильника тощо. Також на точність дозування впливають такі фактори, як: довжини живильника [6], гранулометричний склад і фізико-механічні властивості дозованого матеріалу [7].

Аналіз літературних даних свідчить про недостатню вивченість процесу дозування сипких матеріалів. Зокрема, недостатньо розглянуто фактори, що впливають на рівномірність розподілення сипкого матеріалу, під час його переміщення на живильнику дозатора.

### 3. Об'єкт, мета та задачі дослідження

Об'єктом дослідження є процес зсипання сипкого матеріалу з випускного каналу в бічній частині бункера, яке ставить за мету визначити кінематичні параметри переміщення матеріалу з бункера на живильник, забезпечити високу продуктивність і рівномірний розподіл сипкого матеріалу на живильнику за рахунок використання оптимальних значень товщини шару і швидкості переміщення матеріалу; зменшити похибку дозування.

Для досягнення поставленої мети необхідно забезпечити відповідність інтенсивності зсипання сипкого матеріалу з випускного каналу бункера та інтенсивності його переміщення на несучому органі живильника. Для вирішення цієї задачі було проведено моделювання графіку зміни інтенсивності переміщення сипкого матеріалу за допомогою програмного забезпечення MATLAB.

### 4. Математичне моделювання

Виконаємо математичне моделювання процесу переміщення сипкого матеріалу з бункера на приймальний робочий орган живильника [8–10].

Розглянемо зони структурно-механічного стану сипкого матеріалу під час його зсипання з випускного каналу у боковій частині прямокутного бункера (рис. 2). Експериментальними шляхом було встановлено, що можливо виділити 5 характерних зон. Слід зазначити, що в зоні 5 — частинки матеріалу знаходяться в нерухомому стані.

**Зона 1.** Матеріал переміщується як тверде тіло, з постійною невеликою швидкістю паралельно до стінок бункера.

**Зона 2.** Частинки сипкого матеріалу ковзають одна відносно одній і переміщуються з невеликою змінною швидкістю. Сипкий матеріал характеризується властивостями пластичного стану.

**Зона 3.** Сипкий матеріал знаходиться у пластичному стані.

Швидкість переміщення частинок сипкого матеріалу на виході з динамічного зводу можна визначити за формулою [10]:

$$V_{\text{вих.3}} = \sqrt{2g \cdot \sigma_{\text{вих.2}} / \gamma}. \quad (1)$$

Головне нормальне напруження:

$$\sigma_{\text{вих.2}} = \tau \left( 1 + \frac{1}{f} - \sqrt{1 + f^2} \right), \quad (2)$$

де  $f$  — внутрішній коефіцієнт тертя сипкого матеріалу;  $\tau$  — дотичне напруження:  $\tau = \gamma \cdot x$ ;  $\gamma$  — питома вага продукції;  $x$  — поточне значення абсциси;  $g$  — прискорення вільного падіння.

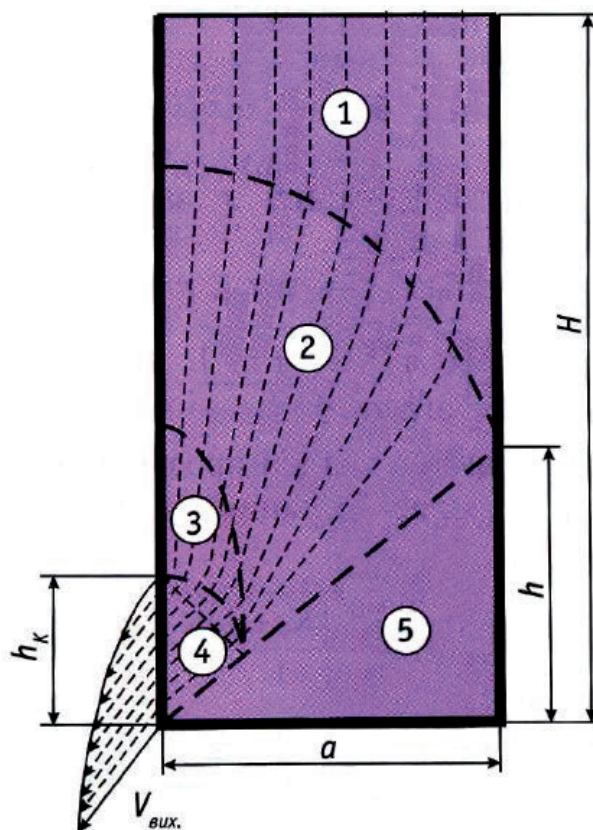


Рис. 2. Зони структурно-механічного стану сипкого матеріалу під час його зсипання з випускного каналу у боковій частині бункера

**Зона 4** — зона обрушення частинок сипкого матеріалу (рис. 3). У ній відбувається зсипання частинок сипкого матеріалу через випускний канал бункера. Частинки знаходяться у вільному дисперсному стані.

Використаємо рівняння Бернуллі для опису переміщення сипкого матеріалу на перерізах 1-1 і 2-2:

$$y + \frac{(V_{\text{вих.3}})^2}{2g} = \frac{(V_{\text{вих.}})^2 (1 + \xi)}{2g}, \quad (3)$$

де  $\xi$  — коефіцієнт місцевих втрат Дарсі-Вейсбаха під час руху сипкого матеріалу в зоні обрушення, що характеризує втрати кінетичної енергії потоку матеріалу внаслідок зіткнення частинок між собою.

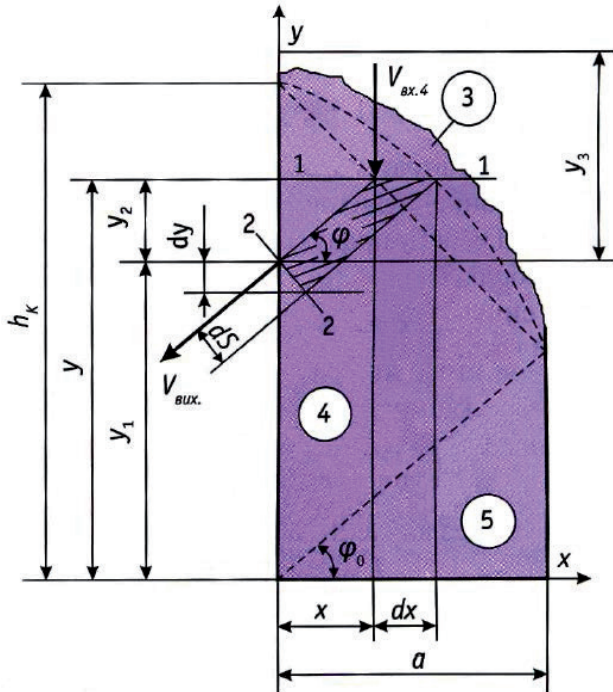


Рис. 3. Розрахункова схема для визначення швидкості зсипання сипкого матеріалу з випускного каналу у боковій частині бункера

Швидкість зсипання сипкого матеріалу з випускного каналу у боковій частині бункера визначається з рівнянь (1)–(3):

$$V_{вих.} = \sqrt{2g \left( y + \frac{\sigma_{вих.2}}{\gamma} \right) / (1 + \xi)}. \tag{4}$$

Завдяки отриманому рівнянню визначаємо інтенсивність переміщення матеріалу через випускний канал:

$$Q_{в.к.} = \frac{2}{3} \cdot \gamma \cdot B \cdot \cos(\varphi) \cdot \left[ \frac{h_k}{K+f} \right]^{\frac{2}{3}} \cdot \sqrt{\frac{2g \cdot (K_1+f)}{\xi+1}}, \tag{5}$$

де  $h_k$  – висота випускної за-  
слінки бункера;  $\varphi$  – кут внут-  
рішнього тертя сипкого мате-  
ріалу;  $B$  – ширина випускного  
канал бункера.

Безрозмірні коефіцієнти  $K$   
та  $K_1$  визначаються за фор-  
мулами:

$$K = 0,5 \left( f + \sqrt{1+f^2} \right); \tag{6}$$

$$K_1 = \frac{1}{f} + f - \sqrt{1+f^2}. \tag{7}$$

Необхідною умовою безпе-  
рвної роботи лінійного ваго-

вого дозатора є забезпечення вільного зсипання матеріалу з випускного каналу бункера та ефективно відведення його робочим органом живильника. Максимальної швидкодії дозатор досягне за умови відповідності інтенсивності зсипання матеріалу з випускного каналу бункера та інтенсивності переміщення на несучому органі живильника:

$$Q_{в.к.} = Q_2, \tag{8}$$

де  $Q_2$  – інтенсивність переміщення матеріалу на робо-  
чому органі живильника:

$$Q_2 = B \cdot \delta \cdot \rho \cdot V_0, \tag{9}$$

де  $V_0$  – швидкість переміщення матеріалу живильником;  
 $\rho$  – щільність матеріалу;  $\delta$  – товщина шару матеріалу  
на робочому органі живильника.

Використовуючи рівняння (5), (8), (9), запишемо  
залежності для визначення наступних параметрів.

Товщина шару сипкого матеріалу на живильнику:

$$\delta = \frac{2}{3 \cdot V_0} \cdot \cos(\varphi) \cdot \left[ \frac{h_k}{K+f} \right]^{\frac{2}{3}} \cdot \sqrt{\frac{2g \cdot (K_1+f)}{\xi+1}}. \tag{10}$$

Необхідна швидкість переміщення сипкого матеріалу  
живильником для забезпечення заданої товщини шару  
матеріалу на ньому:

$$V_0 = \frac{2 \cdot \delta}{3} \cdot \cos(\varphi) \cdot \left[ \frac{h_k}{K+f} \right]^{\frac{2}{3}} \cdot \sqrt{\frac{2g \cdot (K_1+f)}{\xi+1}}. \tag{11}$$

Результати математичного моделювання (4), (10),  
(11), які описують процес витікання сипкого мате-  
ріалу з бункера, представлені у вигляді залежнос-  
тей (рис. 4–7) [11].

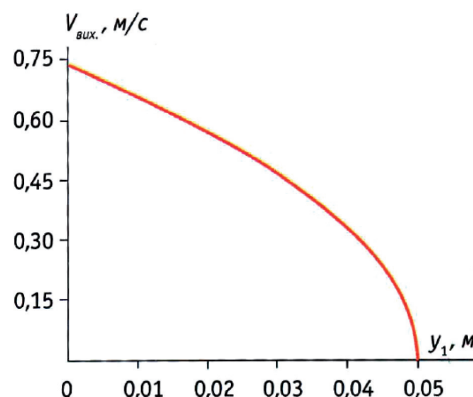


Рис. 4. Залежність швидкості зсипання сипкого матеріалу через випускний канал бункера від висоти рівня потоку

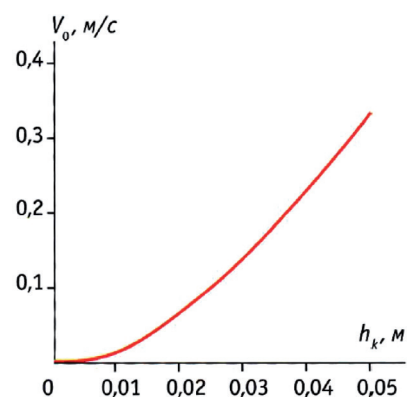


Рис. 5. Залежність швидкості переміщення сипкого матеріалу живильником від висоти випускного каналу

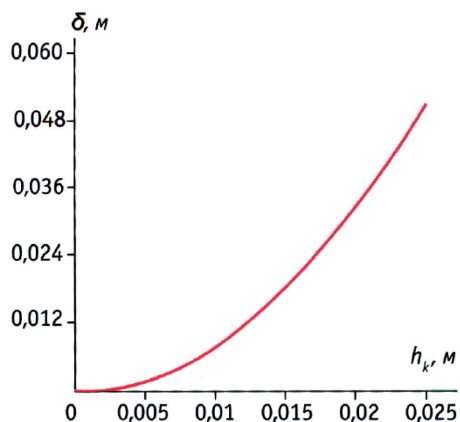


Рис. 6. Залежність товщини шару сипкого матеріалу під час переміщення живильником від висоти випускного клапану бункера

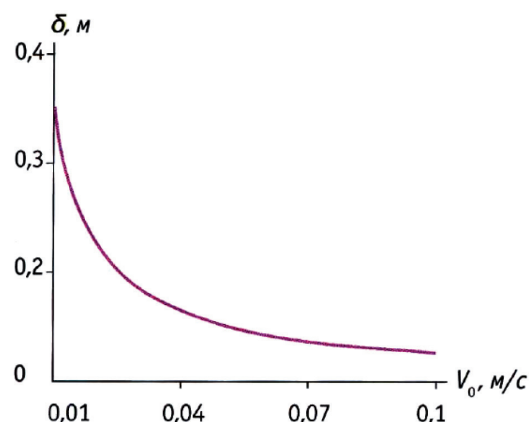


Рис. 7. Залежність товщини шару сипкого матеріалу від швидкості переміщення його живильником

## 5. Моделювання графіку зміни інтенсивності переміщення сипкого матеріалу

Для того, щоб визначити максимально можливу інтенсивність переміщення матеріалу живильником  $Q_{2\max}$ , проведемо моделювання графіку, який відображає зміну інтенсивності переміщення сипкого матеріалу живильником на живильнику. Для цього використаємо програмне забезпечення MATLAB.

Так як експериментальні дані відсутні, були прийняті наступні параметри лінійного вагового дозатора на прикладі дозування пшеничного борошна:

$$B = 0,1 \text{ м};$$

$$\delta = 0,0003 - 0,0015 \text{ (м)};$$

$$\rho = 710 \text{ кг/м}^3;$$

$$V_0 = 0,1 - 0,5 \text{ м/с}.$$

Побудова графіка функції двох змінних в MATLAB на прямокутній області визначення змінних включає два попередніх етапи [12]:

1. Розбиття області визначення прямокутною сіткою.
2. Обчислення значень функції в точках перетину ліній сітки і запис їх у матрицю.

Побудуємо графік функції  $Q_2(V_0, \delta) = B \cdot \delta \cdot \rho \cdot V_0$  на області визначення у вигляді квадрату. Необхідно розбити квадрат рівномірною сіткою і обчислити значення функцій у вузлах, позначених крапками.

Для генерації масивів сітки, де вісь  $X$  приймає значення від 0,5 до 0,1 з кроком  $-0,05$  і  $Y$  — від 0,0003 до 0,0015 з кроком 0,00015 в MATLAB використаємо оператор `meshgrid(X, Y)` (крапка з комою в кінці цього та наступних операторів не ставиться для того, щоб проконтролювати генерацію масивів) (рис. 8) [12].

Далі задамо значення  $B = 0,1$ ,  $\rho = 710$ , розрахуємо  $Q_2$  і за допомогою оператора `surf` (рис. 9) побудуємо графік функції (рис. 10).

```
>> [V0, delta] = meshgrid(0.5:-0.05:0.1,0.0003:0.00015:0.0015)

V0 =

    0.5000    0.4500    0.4000    0.3500    0.3000    0.2500    0.2000    0.1500    0.1000
    0.5000    0.4500    0.4000    0.3500    0.3000    0.2500    0.2000    0.1500    0.1000
    0.5000    0.4500    0.4000    0.3500    0.3000    0.2500    0.2000    0.1500    0.1000
    0.5000    0.4500    0.4000    0.3500    0.3000    0.2500    0.2000    0.1500    0.1000
    0.5000    0.4500    0.4000    0.3500    0.3000    0.2500    0.2000    0.1500    0.1000
    0.5000    0.4500    0.4000    0.3500    0.3000    0.2500    0.2000    0.1500    0.1000
    0.5000    0.4500    0.4000    0.3500    0.3000    0.2500    0.2000    0.1500    0.1000
    0.5000    0.4500    0.4000    0.3500    0.3000    0.2500    0.2000    0.1500    0.1000
    0.5000    0.4500    0.4000    0.3500    0.3000    0.2500    0.2000    0.1500    0.1000

delta =

    0.0003    0.0003    0.0003    0.0003    0.0003    0.0003    0.0003    0.0003    0.0003
    0.0004    0.0004    0.0004    0.0004    0.0004    0.0004    0.0004    0.0004    0.0004
    0.0006    0.0006    0.0006    0.0006    0.0006    0.0006    0.0006    0.0006    0.0006
    0.0008    0.0008    0.0008    0.0008    0.0008    0.0008    0.0008    0.0008    0.0008
    0.0009    0.0009    0.0009    0.0009    0.0009    0.0009    0.0009    0.0009    0.0009
    0.0011    0.0011    0.0011    0.0011    0.0011    0.0011    0.0011    0.0011    0.0011
    0.0012    0.0012    0.0012    0.0012    0.0012    0.0012    0.0012    0.0012    0.0012
    0.0014    0.0014    0.0014    0.0014    0.0014    0.0014    0.0014    0.0014    0.0014
    0.0015    0.0015    0.0015    0.0015    0.0015    0.0015    0.0015    0.0015    0.0015
```

Рис. 8. Генерація масиву сітки за допомогою оператора `meshgrid`

```

>> B = [0.1]

B =

    0.1000

>> ro = [710]

ro =

    710

>> Q2 = B.*delta.*ro.*V0

Q2 =

    0.0107    0.0096    0.0085    0.0075    0.0064    0.0053    0.0043    0.0032    0.0021
    0.0160    0.0144    0.0128    0.0112    0.0096    0.0080    0.0064    0.0048    0.0032
    0.0213    0.0192    0.0170    0.0149    0.0128    0.0107    0.0085    0.0064    0.0043
    0.0266    0.0240    0.0213    0.0186    0.0160    0.0133    0.0107    0.0080    0.0053
    0.0319    0.0288    0.0256    0.0224    0.0192    0.0160    0.0128    0.0096    0.0064
    0.0373    0.0335    0.0298    0.0261    0.0224    0.0186    0.0149    0.0112    0.0075
    0.0426    0.0383    0.0341    0.0298    0.0256    0.0213    0.0170    0.0128    0.0085
    0.0479    0.0431    0.0383    0.0335    0.0288    0.0240    0.0192    0.0144    0.0096
    0.0533    0.0479    0.0426    0.0373    0.0319    0.0266    0.0213    0.0160    0.0107

>> surf(V0, delta, Q2)

```

Рис. 9. Розрахунок інтенсивності переміщення сипкого матеріалу на робочому органі живильника

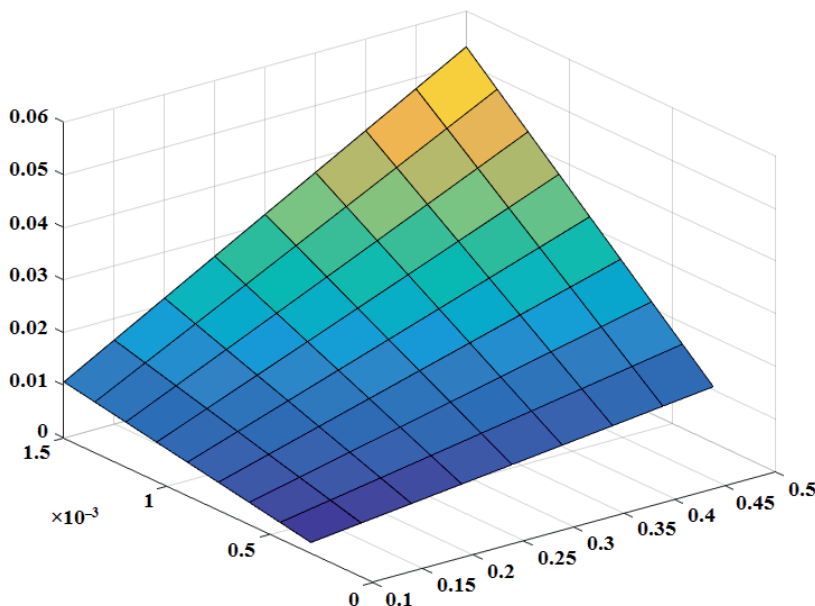


Рис. 10. Графік зміни інтенсивності переміщення сипкого матеріалу живильником від товщини шару та швидкості переміщення матеріалу на живильнику

Операція  $*$  призводить до поелементного множення векторів однакової довжини. У результаті виходить вектор з елементами, рівними добутку відповідних елементів вихідних векторів.

Функція  $\text{surf}(X, Y, Z)$  будує каркасну поверхню графіка функції і заливає кожен область поверхні певним кольором.

## 6. Перевірка отриманих результатів

Аналізуючи рівняння (9) за допомогою графіку на рис. 10, проведений при прийнятих граничних значеннях на наступні параметри: товщину шару матеріалу  $\delta_{\min} \leq \delta \leq h_k$ , швидкість переміщення матеріалу

$V_{0\min} \leq V_0 \leq V_{0\max}$ , встановлено, що існує така пара значень  $\delta_{\text{опт}}$ ,  $V_{\text{опт}}$  при яких  $Q_2 \rightarrow Q_{2\max}$ .

Отже, максимальне можливе значення інтенсивності переміщення матеріалу набуває при умові:

$$V_{0\text{опт}} = V_{0\min} + (\delta_{\text{опт}} - \delta_{\min}) \cdot \frac{V_{0\max} - V_{0\min}}{h_k - \delta_{\min}} \quad (12)$$

За допомогою графіків, наведених на рис. 11, можна визначити оптимальні значення швидкості переміщення сипкого матеріалу живильником  $V_{0\text{опт}}$  і відповідну товщину шару матеріалу  $\delta_{\text{опт}}$ , що забезпечує максимально можливу інтенсивність переміщення матеріалу живильником  $Q_{2\max}$ .

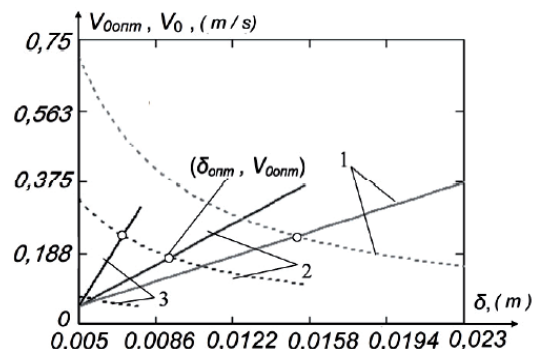


Рис. 11. Графік зміни необхідної (---) і теоретичної оптимальної (—) швидкості переміщення сипкого матеріалу живильником для: 1 —  $h_k = 0,03$  м; 2 —  $h_k = 0,02$  м; 3 —  $h_k = 0,01$  м

## 7. Висновки

У результаті проведених досліджень було встановлено, що нерівномірність зсипання сипкого матеріалу у зважувальну ємність — це головне джерело режимної динамічної похибки дозування. Для того, щоб забезпечити відносно високу точність дозування, необхідно забезпечити сталу інтенсивність переміщення сипкого матеріалу, а також відповідність інтенсивності його зсипання з випускного каналу бункера та інтенсивності переміщення на несучому органі живильника.

Інтенсивність переміщення сипкого матеріалу у лінійному ваговому дозаторі залежить від рівня наповненості бункера, швидкості зсипання його з бункера, висоти випускної заслінки, рівномірності розподілення шару матеріалу та швидкості руху його на живильнику. Не залежить від типу живильника і бункера лінійного вагового дозатора, та виду дозованого матеріалу.

Підводячи підсумки, для того, щоб мінімізувати похибку дозування сипких матеріалів необхідно забезпечити:

— ефективну роботу бункера дозатора, тобто ефективно керувати процесом зсипання матеріалу через випускні заслінки;

— ефективну роботу живильника дозатора, тобто ефективно керувати процесом відведення сипкого матеріалу від випускної заслінки живильником, та процесом зсипання сипкого матеріалу з робочого органу живильника в зважувальну ємність.

Забезпечити сталу інтенсивність руху матеріалу за різних режимів роботи лінійного вагового дозатора можливо шляхом використання додаткових допоміжних пристроїв, пошуку більш раціональних геометричних параметрів структурних елементів дозатора та кінематичних параметрів руху матеріалу тощо.

## Література

1. Гавва, О. М. Обладнання для пакування продукції у споживчу тару [Текст] / О. М. Гавва, А. П. Беспалько, А. І. Волчко. — К.: ІАЦ «Упаковка», 2008. — 436 с.
2. Катыльмов, А. В. Дозирование сыпучих и вязких материалов [Текст] / А. В. Катыльмов, В. А. Любартович. — Л.: Химия, 1990. — 240 с.
3. Масло, М. А. Вдосконалення вагових дозаторів [Текст] / М. А. Масло // Упаковка. — 2003. — № 28. — С. 29.
4. Овчаренко, А. И. Погрешность дозирования сыпучих продуктов [Текст] / А. И. Овчаренко, А. Д. Середя, М. В. Шапиро // Упаковка. — 2007. — № 1. — С. 44–47.
5. Овчаренко, А. И. Пути повышения качества дозирования крупнодисперсных продуктов [Текст] / А. И. Овчаренко // Хлебопекарское и кондитерское дело. — 2008. — № 3. — С. 50–51.
6. Donis, V. K. How the Conveyor Belt Length Affects Belt Weigher Accuracy [Text] / V. K. Donis, A. E. Rachkovskii, V. M. Sin // Measurement Techniques. — Vol. 47, № 2. — P. 163–167. 2004. doi:10.1023/b:mete.0000026215.97105.55

7. Aleksandrovic, S. Analysis of Belt Weigher Accuracy Limiting Factors [Text] / S. Aleksandrovic, M. Jovic // International Journal of Coal Preparation and Utilization. — 2011. — Vol. 31, № 5. — P. 223–241. doi:10.1080/19392699.2011.552896
8. Соколовский, В. В. Статика сыпучей среды [Текст] / В. В. Соколовский. — М.: Наука, 1990. — 272 с.
9. Зенков, Р. Л. Бункерные устройства [Текст] / Р. Л. Зенков, Г. П. Гриневич, В. С. Исаев. — М.: Машиностроение, 1977. — 223 с.
10. Кирия, Р. В. Истечение сыпучего груза из бункера с боковым щелевым отверстием [Текст] / Р. В. Кирия, Д. Д. Брагинец, Б. И. Мостовой // Сборник научных трудов Национального горного университета. — 2009. — № 34. — С. 114–122.
11. Гавва, О. М. Лінійні вагові дозувальні пристрої дискретної дії для сипкої продукції [Текст] / О. М. Гавва, А. В. Деревніська // Упаковка. — 2014. — № 1. — С. 50–52.
12. Графики Язык программирования Matlab. Обучающие уроки [Электронный ресурс]. — Режим доступа: \www/URL: http://life-prog.ru/view\_cat.php?cat=5. — 02.02.2010. — Загл. с экрана.

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДОЗИРОВАНИЯ СЫПУЧЕГО МАТЕРИАЛА

Проведено математическое моделирование процесса перемещения сыпучего материала из бункера линейного весового дозатора на приемный рабочий орган питателя. Рассмотрены 5 характерных зон структурно-механического состояния сыпучего материала при его ссыпании с выпускного канала в боковой части бункера. Выведена формула, которая описывает скорость ссыпания материала. Проведено моделирование графика изменения интенсивности перемещения сыпучего материала с помощью программного обеспечения MATLAB.

**Ключевые слова:** дозирование, сыпучий материал, линейный весовой дозатор, ссыпание, интенсивность, точность, MATLAB.

*Коваленко Игорь Валентинович, кандидат технических наук, доцент, кафедра химического, полимерного та силікатного машинобудування, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Україна.*

*Янцибаєв Дмитро Сергійович, кафедра химического, полимерного та силікатного машинобудування, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Україна, e-mail: atrei69@gmail.com.*

*Коваленко Игорь Валентинович, кандидат технических наук, доцент, кафедра химического, полимерного и силикатного машиностроения, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», Украина.*

*Янцибаев Дмитрий Сергеевич, кафедра химического, полимерного и силикатного машиностроения, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», Украина.*

*Kovalenko Ihor, National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Ukraine.*

*Yantsibayev Dmitry, National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Ukraine, e-mail: atrei69@gmail.com*