

# Лінійні вагові дозувальні пристрої дискретної дії для сипкої продукції (обґрунтування раціональних параметрів)

О.М. Гавва, д.т.н., А.В. Деренівська, Національний університет харчових технологій, м. Київ

*Підвищення точності дозування сипких продуктів є актуальним завданням, виконання якого зменшує ризики виробника та покупця харчової продукції. Вирішення такого завдання полягає, зокрема, у вдосконаленні дозувальних пристроїв пакувальних машин, яке передбачає дослідження їхніх характеристик на основі комплексного підходу до проектування. Для цього потрібно провести оцінювання їхніх метрологічних характеристик і шляхів підвищення точності функціонування та продуктивності для конкретних видів сипкої продукції [1–3].*

## Загальна ситуація

Сьогодні на ринку машин для пакування сипкої продукції домінують машини з лінійними ваговими дозаторами. Це пояснюється тим, що такі дозатори мають оптимальне співвідношення вартості, точності дозування та продуктивності. У загальному вигляді структуру сучасного лінійного вагового дозатора для сипкої продукції можна навести як сукупність елементів, кожний з яких виконує окремі функції операції дозування (рис. 1) [2]. Сипка продукція безперервно або періодично подається у приймальний бункер 1, звідки через випускний канал 2 потрапляє на живильник 3 та переміщується до ємкості 4, де формується доза. Вага продукції, що набирається у ємкість, вимірюється датчиком ваги 5 і контролюється системою керування 6. У сучасних зразках пакувального обладнання система керування 6 містить контролер та аналого-цифровий перетворювач. Під час наближення маси продукції, яка знаходиться у зважувальній ємкості, до величини заданої дози система керування 7 переводить транспортну систему у режим повільної контрольованої подачі та за умови досягнення заданої дози зупиняє транспортну систему. Кожний елемент структури сучасного лінійного вагового дозатора для сипкої харчової продукції, який виконує окремі функції (накопичення, живлення, дозування), та режими його роботи впливають на основні характеристики пакувальної машини: точність дозування, продуктивність. Для вирішення поставленої мети важливо визначити вплив структурних елементів, компоувальної схеми та конструкційних виконань окремих елементів дозатора, режимів їхньої роботи та взаємозв'язок між ними. У наукових працях [4, 5] виділено три типи похибок (джерела похибок дозування):

- **дрейфовий** — характеризується пусковими режимами дозатора. Мінімального значення досягає під час введення затримок між вмиканням і початком дозування;
- **статичний** — обумовлюється неточністю виконання конструктивних елементів зважувальної системи тощо. Цей тип похибок складає десяту частину відсотка;
- **динамічний** — викликаний перехідними процесами в тензодатчиках під час падіння продукції у зважувальну

ємкість. Для його зменшення потрібні додаткові часові витрати (встановлення фільтрів, запрограмованих для визначення середнього значення ваги). Це зменшує продуктивність дозатора.

Динамічна похибка має дві складові: режимну і власну. Режимна похибка залежить від інтенсивності подачі продукції, площі перерізу випускного каналу бункера та живильника тощо. Власна похибка обумовлена фізико-механічними властивостями сипкої продукції та її взаємодією з робочими органами дозатора. Конструктор зменшити її майже не може. Тому основною регульованою складовою похибки дозування є режимна похибка.

Авторами досліджень [4, 5] встановлено, що основними заходами щодо зниження режимної похибки дозування є: збільшення відносної частки тривалості досипання; зменшення швидкості руху продукції під час швидкого та повільного наповнення зважувальної ємкості, прохідного перерізу живильника за різних режимів наповнення зважувальної ємкості, а також зазору між нижньою кромкою

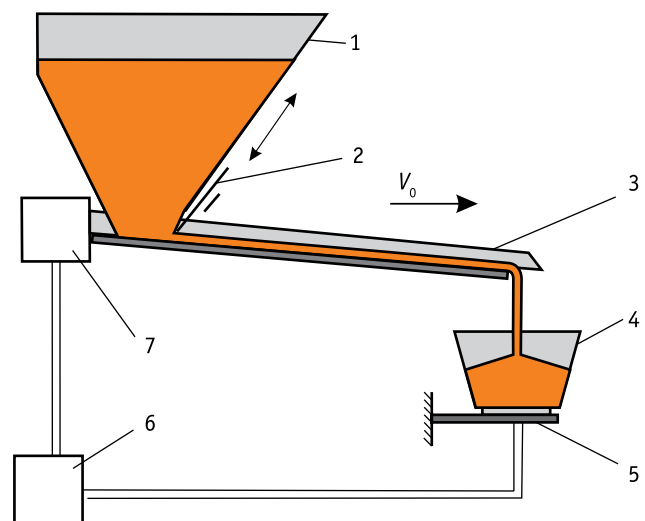


Рис. 1. Структурна схема лінійного вагового дозатора для сипкої продукції



бункера і робочою поверхнею живильника; застосування спеціальних заходів по стабілізації шару продукції (багато-ступеневе віброущільнення, згладжування щітками, регулювання поперечного перерізу каналу бункера тощо); стабілізація тиску продукції в бункері на робочий елемент живильника.

Крім того, слід зазначити, що між точністю дозування та продуктивністю існує певна функціональна залежність. Точність дозування зменшується у разі підвищення продуктивності внаслідок збільшення: швидкості витікання продукції з випускного каналу бункера; швидкості подачі продукції живильником; шару продукції на робочому органі живильника; відносної частки тривалості «грубого» дозування завдяки зменшенню частки тривалості «тонкого» дозування.

Експериментальними дослідженнями встановлено, що нерівномірність подачі сипкої продукції у зважувальну ємкість — основне джерело режимної складової динамічної похибки дозування. Достатньо високу точність дозування можна забезпечити за умови сталої інтенсивності переміщення сипкої продукції.

Інтенсивність переміщення продукції в лінійному ваговому дозаторі залежить від рівня заповнення бункера, швидкості витікання її з бункера, положення заслінки в бункері, рівномірності розподілення та швидкості переміщення її на живильнику і не залежить від типу бункера та живильника лінійного дозатора, виду дозованої продукції. А тому можна зробити висновок, що для мінімізації похибки дозування необхідно забезпечити:

- ефективну роботу бункера, тобто керувати процесом витікання продукції через його випускний канал;
- ефективну роботу живильника, тобто керувати процесом відведення сипкої продукції від випускного каналу бункера живильником та процесом падіння сипкої продукції з робочого органу живильника в мірну ємкість.

Встановити сталу інтенсивність переміщення продукції за різних режимів роботи лінійного вагового дозатора можливо шляхом використання додаткових допоміжних при-

<p>ВИБРОНИЧА КОМПАНІЯ</p> <p><b>ДЕТАЛЬ ВМ</b></p> <p>ЯКІСТЬ В ДЕТАЛЯХ</p>	<p>Виробнича компанія «Деталь ВМ» Україна, 20700, Черкаська обл., м. Сміла, вул. Жовтнева, 81, тел.: 067 795-90-97, факс: (04733) 22-404, e-mail: detalvm@gmail.com http://detailvm.com.ua</p>
<p><b>Виготовлення запасних частин по вашим кресленням або оригінальним зразкам деталей та вузлів для тютюнових фабрик, машинобудівної, фармацевтичної промисловості, а також для підприємств харчової, хімічної, будівельної, агропромислової галузей.</b></p> <p><b>Деталі будь-якої складності від 1 шт. до цілої серії, згідно з технічною документацією та з дотриманням усіх вимог ГОСТів і ТУ, а також з урахуванням специфіки, запропонованої замовником.</b></p>	

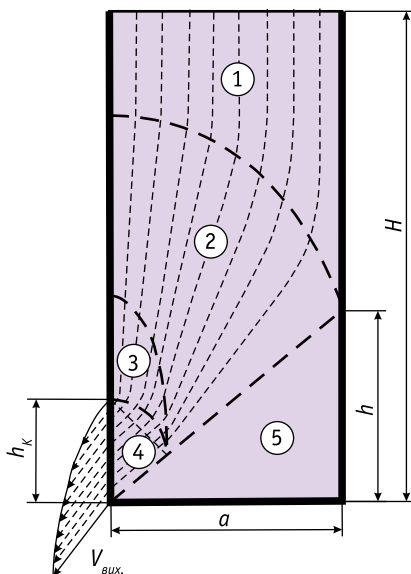
строїв, пошуку раціональних геометричних параметрів структурних елементів дозатора та кінематичних параметрів переміщення продукції тощо.

Поряд із наведеними заходами важливими чинниками підвищення точності дозування і продуктивності є: забезпечення вільного витікання продукції з випускного каналу бункера; вибір закону руху заслінки в бункері відповідно до режимів роботи живильника під час «тонкого» та «грубого» дозування; раціональне розташування зважувальної ємкості; орієнтування струмини продукції, яка падає в мірну ємкість.

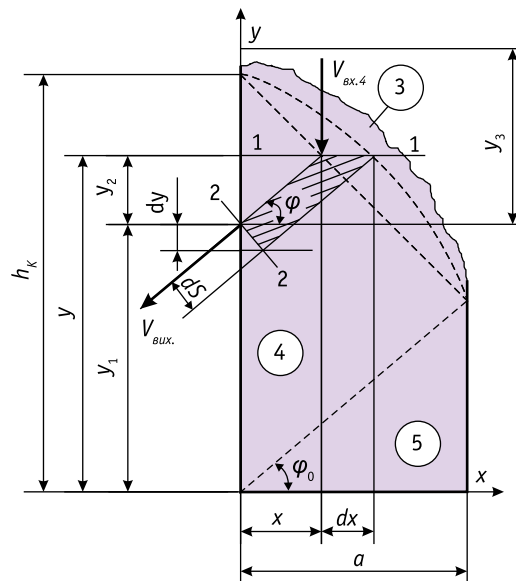
### Дослідження процесу витікання сипкої харчової продукції з випускного каналу бункера

Для визначення умов вільного витікання продукції з бункера виконаємо математичне моделювання процесу переміщення сипкої продукції з бункера на приймальний робочий орган живильника [6–8].

Розглянемо зони структурно-механічного стану сипкої харчової продукції під час її витіканні з випускного каналу у боковій частині прямокутного бункера (рис. 2). Експериментальними дослідженнями встановлено, що можна виділити 5 характерних зон. Слід зазначити, що в **зоні 5** — частинки знаходяться в нерухомому стані.



**Рис. 2.** Зони структурно-механічного стану сипкої харчової продукції під час її витікання з випускного каналу у боковій частині бункера



**Рис. 3.** Розрахункова схема для визначення швидкості витікання сипкої харчової продукції з випускного каналу у боковій частині бункера

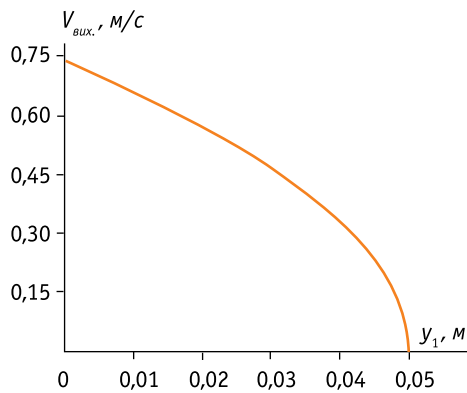


Рис. 4. Залежність швидкості виходу сипкої продукції через випускний канал бункера від висоти рівня потоку

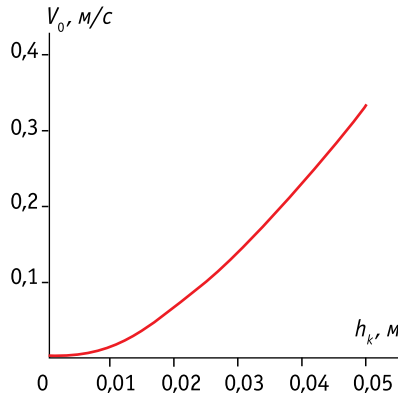


Рис. 5. Залежність швидкості переміщення сипкої продукції живильником від висоти випускного каналу

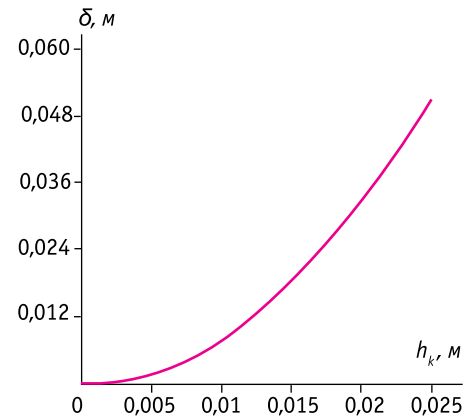


Рис. 6. Залежність товщини шару сипкої продукції під час переміщення живильником від висоти випускного каналу бункера

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

**Зона 2.** Частинки сипкої продукції ковзають одна відносно одної і рухаються з невеликою змінною швидкістю. Сипка продукція характеризується властивостями пластичного стану.

**Зона 3.** Сипка харчова продукція знаходиться у пластичному стані.

Швидкість переміщення частинок сипкої харчової продукції на виході з динамічного склепіння можна визначити за формулою [8]:

$$V_{вих.3} = (2g \cdot \sigma_{вих.2} / \gamma)^{0.5}. \quad (1)$$

Головне нормальне напруження:

$$\sigma_{вих.2} = \tau (1 + 1/f - (1 + f^2)^{0.5}), \quad (2)$$

де  $f$  — внутрішній коефіцієнт тертя сипкої харчової продукції;

$\tau$  — дотичне напруження:  $\tau = \gamma \cdot x$ ;

$\gamma$  — питома вага продукції;

$g$  — прискорення вільного падіння.

**Зона 4** — зона обрушення частинок сипкої харчової продукції. Частинки знаходяться у вільно дисперсному стані.

Використаємо рівняння Бернуллі для опису переміщення сипкої продукції в перерізах 1–1 та 2–2 (рис. 3):

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

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

Швидкість витікання сипкої харчової продукції з випускного каналу у боковій частині бункера з рівнянь 1–3 визначається:

$$V_{вих.} = [2g (y + \sigma_{вих.2} / \gamma) / (1 + \xi)]^{0.5}. \quad (4)$$

Завдяки отриманому рівнянню визначаємо інтенсивність переміщення продукції через випускний канал:

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

де  $h_k$  — висота випускного каналу;

$\varphi$  — кут внутрішнього тертя сипкої продукції;

$B$  — ширина випускного каналу бункера.

Безрозмірні коефіцієнти  $K$  та  $K_1$  визначаються за формулами:

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

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

Необхідною умовою безперебійної роботи лінійного вагового дозувального пристрою є забезпечення вільного витікання продукції з випускного каналу бункера і постійного відбирання її приймальним робочим органом живильника. Максимальної швидкодії дозатор досягне за умови відповідності інтенсивностей витікання продукції з випускного каналу бункера та переміщення її на несучому органі живильника:

$$Q_{в.к.} = Q_{ж.}, \quad (8)$$

де  $Q_{ж.}$  — інтенсивність переміщення продукції на робочому органі живильника:

$$Q_{ж.} = B \cdot \delta \cdot \rho \cdot V_0; \quad (9)$$

$V_0$  — швидкість переміщення продукції живильником;

$\rho$  — щільність продукції;

$\delta$  — товщина шару продукції на робочому органі живильника.

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

Товщина шару сипкої продукції на живильнику:

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

Необхідна швидкість переміщення сипкої продукції живильником для забезпечення заданої товщини шару продукції на ньому:

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

Результати математичного моделювання (4, 10, 11), які описують процес витікання сипкої продукції з бункера, представлені у вигляді залежностей (рис. 4–7).

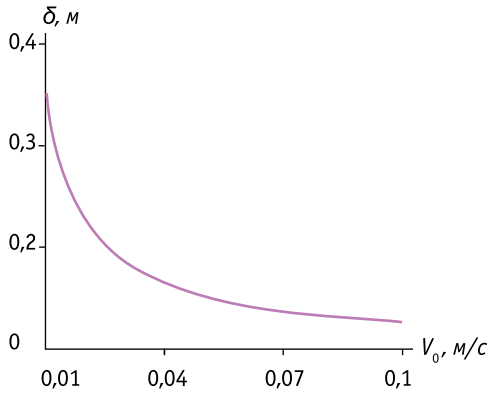


Рис. 7. Залежність товщини шару сипкої продукції від швидкості переміщення її живильником

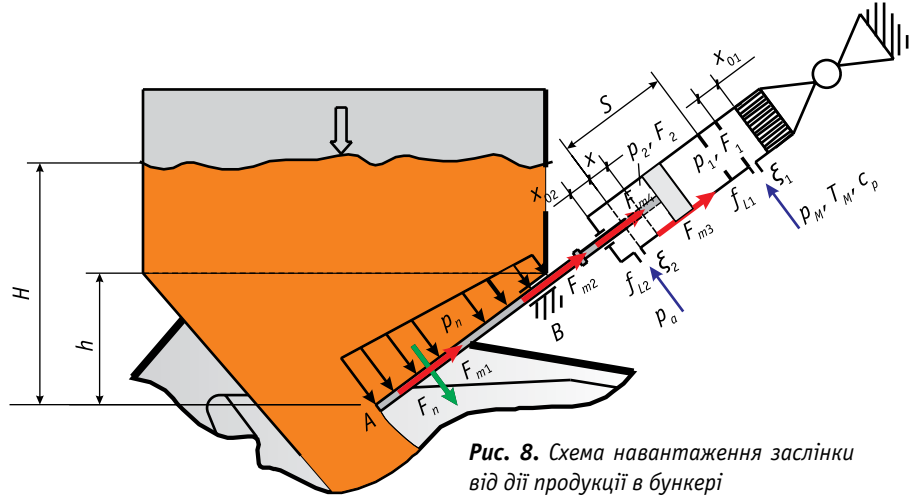


Рис. 8. Схема навантаження заслінки від дії продукції в бункері

Проведеним дослідженням встановлено, що інтенсивність витікання продукції з бункера можна регулювати шляхом зміни геометричних розмірів випускного каналу, тобто положення заслінки.

### Дослідження процесу витікання сипкої харчової продукції з бункера із приводною заслінкою

За різних режимів роботи дозатора (за умови «тонкого» та «грубого» дозування) інтенсивність переміщення сипкої харчової продукції живильником може змінюватися в 5–10 разів. Для забезпечення максимальної продуктивності та мінімізації однієї зі складових режимної похибки дозування необхідно постійно узгоджувати інтенсивності витікання сипкої продукції з випускного каналу бункера та переміщення її живильником. Для цього пропонується використати для бункера приводну заслінку, яка здійснює зворотно-поступальний рух. Закон руху заслінки в бункері вибирається відповідно до режимів роботи живильника.

Для визначення раціональних кінематичних і динамічних параметрів переміщення заслінки, залежно від інтенсивності переміщення продукції з бункера, за допомогою позиційного пневмоприводу розроблена математична модель руху заслінки. Схема силового навантаження на приводну заслінку представлена на рис. 8.

Рівняння руху приводної заслінки можна навести у вигляді [9, 10]:

$$M \cdot (d^2x) / (dt^2) = p_1 \cdot F_1 - p_2 \cdot F_2 - p_a \cdot (F_1 - F_2) - F_m \quad (12)$$

Рівняння зміни тиску в нагнітальній камері:

$$dp_1 / dt = \{k \cdot f_{L1} \cdot (R_2 \cdot T_M \cdot (p_M^2 - p_1^2)^{0.5} / [F_1 \cdot (x + x_{01}) \cdot (\xi_1)^{0.5}]\} - \{k \cdot p_1 \cdot dx / [(x + x_{01}) dt]\} \quad (13)$$

Рівняння зміни тиску в штоковій камері:

$$dp_2 / dt = \{k \cdot f_{L2} \cdot (R_2 \cdot T_2 \cdot (p_2^2 - p_a^2)^{0.5} / [F_2 \cdot (S - x + x_{02}) \cdot (\xi_2)^{0.5}]\} - \{k \cdot p_2 \cdot dx / [(S - x + x_{02}) \cdot dt]\} \quad (14)$$

де  $M$  — приведена маса рухомих частин шиберної заслінки та позиційного пневмоприводу;

$x$  — поточне значення переміщення штока позиційного пневмоприводу;

$t$  — тривалість переміщення штока позиційного пневмоприводу;

$p_1, p_2$  — тиск у поршневій та штоковій камерах;

$p_a$  — атмосферний тиск;

$F_1$  — площа поперечного перерізу поршня;

$F_2$  — корисна торцева площа поршня;

$k$  — коефіцієнт переміщення сипкої продукції;

$f_{L1}$  — площа перерізу вхідної пневмомагістралі;

$f_{L2}$  — площа перерізу вихідного трубопроводу;

$T_2$  — температура повітря, що відводиться з пневмоциліндра;

$T_M$  — температура повітря в магістралі;

$R_2 = 287$  — питома газова стала, Дж/(кг · К);

$S$  — робочий хід штока;

$x_{01}, x_{02}$  — приведена початкова (кінцева) координата положення поршня;

$\xi_1, \xi_2$  — коефіцієнт опору вхідного (вихідного) трубопроводу;

$F_m$  — узагальнена сила тертя ковзання.

Узагальнена сила тертя ковзання становить:

$$F_m = F_{m1} + F_{m2} + F_{m3} + F_{m4} \quad (15)$$

де  $F_{m1}$  — сила тертя ковзання продукції по заслінці:

$$F_{m1} = f_1 \cdot F_n \quad (16)$$

$F_{m2}$  — сила тертя ковзання заслінки по напрямній:

$$F_{m2} = f_2 \cdot (F_n + m \cdot g) \quad (17)$$

$F_{m3}$  — сила тертя ковзання поршня позиційного пневмоприводу в циліндрі:

$$F_{m3} = f_3 \cdot F_n \quad (18)$$

$F_{m4}$  — сила тертя ковзання штока позиційного пневмоприводу в ущільненнях:

$$F_{m4} = f_4 \cdot F_n \quad (19)$$

де  $m$  — маса шиберної заслінки;

$f_1, f_2, f_3, f_4$  — коефіцієнти тертя ковзання продукції по заслінці, заслінки по напрямній, поршня по циліндру позиційного пневмоприводу; штока по ущільненню позиційного пневмоприводу відповідно;

$F_n$  — рівнодіюче нормальне навантаження від дії сипкої продукції на приводну заслінку, яке можна визначити з виразу:

$$F_n = 0,5 \cdot (\cos^2\alpha + k \cdot \sin^2\alpha) \cdot \gamma \cdot S \cdot l \cdot b \cdot (H + h) \quad (20)$$



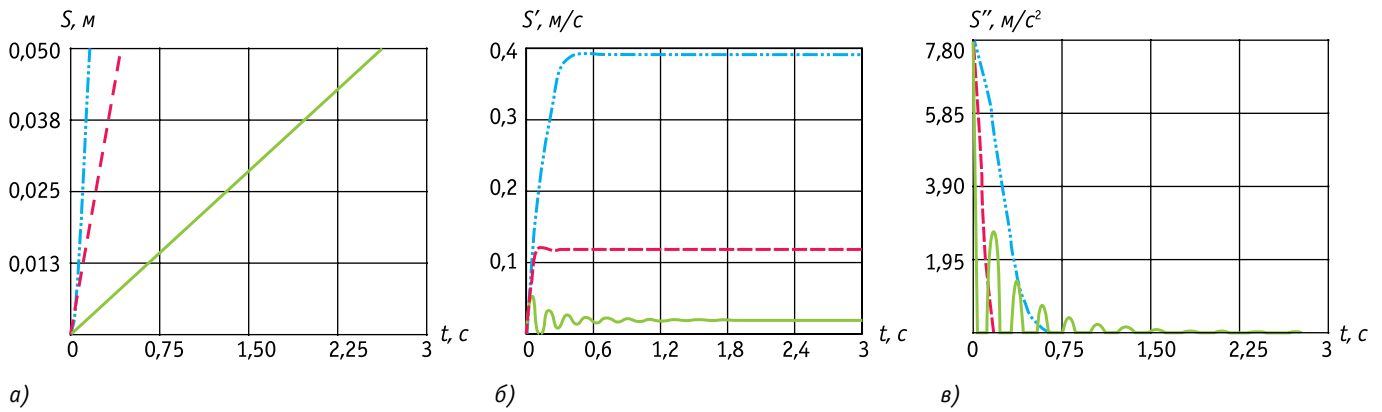


Рис. 9. Залежність переміщення штока (а), швидкості (б) та прискорення (в) по часу за умови:  $f_{L1} = f_{L2} = 7 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$  (—);  $f_{L1} = 1,8 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2, f_{L2} = 7 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$  (- - -);  $f_{L1} = 2,8 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2, f_{L2} = 7 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$  (—)

де  $\alpha$  — кут нахилу до горизонту приводної заслінки бункера;

$l$  — довжина робочої ділянки заслінки;

$b$  — ширина заслінки;

$H, h$  — висота рівня продукції над заслінкою відповідно в точках А та В.

Результати числових розрахунків залежностей (12–20), що описують переміщення заслінки в бункері за допомогою позиційного пневмоприводу, представлені на рис. 9 за таких вихідних даних: продукція — пшона;  $\gamma = 800 \text{ кг/м}^3$ ;  $b = 0,1 \text{ м}$ ;  $S = 0,05 \text{ м}$ ;  $h = 0,380 \text{ м}$ ;  $H = 0,790 \text{ м}$ ;  $M = 1 \text{ кг}$ ;  $p_a = 1 \text{ бар}$ ;  $p_m = 6 \text{ бар}$ ;  $F_1 = 2,011 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$ ;  $F_2 = 1,728 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$ ;  $T_M = 290 \text{ К}$ ;  $S = 0,050 \text{ м}$ ;  $x_{01} = x_{02} = 0,05 \text{ м}$ . Видно, що для реалізації будь-якого закону безперервного руху достатньо за відповідною функціональною залежністю змінювати площу перерізу вхідного отвору порожниці наповнення  $f_{L1}$  пневмоциліндра. Таке технічне рішення дає змогу регулювати інтенсивність видачі продукції з бункера.

## Література

1. Гавва О.М. Обладнання для пакування продукції у споживчу тару / О.М. Гавва, А.П. Беспалько, А.І. Волчко. — К.: ІАЦ «Упаковка», 2008. — 436 с.
2. Катыльмов А.В. Дозирование сыпучих и вязких материалов / А.В. Катыльмов, В.А. Любартович. — Л.: Химия, 1990. — 240 с.
3. Масло М.А. Вдосконалення вагових дозаторів / М.А. Масло // Упаковка. — 2003. — № 28. — С. 29.
4. Овчаренко А.И. Погрешность дозирования сыпучих продуктов / А.И. Овчаренко, А.Д. Середа, М.В. Шапиро // Упаковка. — 2007. — № 1. — С. 44–47.
5. Овчаренко А.И. Пути повышения качества дозирования крупнодисперсных продуктов / А.И. Овчаренко // Хлебопекарское и кондитерское дело. — 2008. — № 3. — С. 50–51.
6. Соколовский В.В. Статика сыпучей среды / В.В. Соколовский. — М.: Наука, 1990. — 272 с.
7. Зенков Р.Л. Бункерные устройства / Р.Л. Зенков, Г.П. Гриневич, В.С. Исаев. — М.: Машиностроение, 1977. — 223 с.

8. Кирия Р.В. Истечение сыпучего груза из бункера с боковым щелевым отверстием / Р.В. Кирия, Д.Д. Брагинец, Б.И. Мостовой // Сборник научных трудов Национального горного университета. — Днепропетровск, 2009. — № 34. — С. 114–122.

9. Герц Е.В. Пневматические устройства и системы в машиностроении / Е.В. Герц. — М.: Машиностроение, 1981. — 408 с.

10. Герц Е.В. Расчет пневмоприводов / Е.В. Герц, Г.В. Крейнин. — М.: Машиностроение, 1975. — 272 с. ✓

(Закінчення статті в наступному номері)

## Линейные весовые дозирующие устройства дискретного действия для сыпучей продукции (обоснование рациональных параметров)

А.Н. Гавва, д.т.н., А.В. Дереновская

Сегодня машины с линейными весовыми дозаторами доминируют на рынке машин для упаковки сыпучей продукции. Функционирование каждого элемента структуры линейного весового дозатора влияет на основные характеристики упаковочной машины: точность дозирования и производительность. Авторы установили, что между точностью дозирования и производительностью существует определенная функциональная зависимость. Поэтому поиск оптимальных параметров весовых дозаторов должен осуществляться в плоскости многокритериальной оптимизации. В этой статье авторы приводят результаты исследований по определению таких рациональных параметров, как: геометрические параметры бункера и интенсивность вытекания продукции из его канала; интенсивность перемещения продукции питателем.

Ключевые слова: линейный весовой дискретный дозатор; бункер; питатель; емкость для взвешивания; точность дозирования; производительность; сыпучая продукция.

## Linear weighted dosing discrete action for particulate product (substantiation of rational parameters)

O.M. Gavva, Dr., A.V. Derenivska

Today machines with linear weigher are dominated on the market packaging machines for particulate product. Operation of each structure element linear weigher affect the basic characteristics of the packaging machine: dosing accuracy and performance. The authors found a functional relationship between dosing accuracy and performance. Therefore, the search for optimal parameters weight feeders should be carried out in the plane of multiobjective optimization. In this article the authors present the results of studies to determine the rational parameters such as: geometrical parameters of the hopper and the intensity of the outflow channel with its products, the intensity displacement feeder products.

Key words: linear weight discrete dispenser; hopper; feeder; weighting container; dosing accuracy; performance; granular products.