

С.В. ТОКАРЧУК, канд. техн. наук,
 О.М. ГАВВА, д-р техн. наук
 Національний університет харчових технологій

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПЕРВИННИХ ПОХИБОК ТА ЗАЗОРІВ НА ТОЧНІСТЬ ДОЗУВАННЯ

Виконано дослідження впливу на величину систематичної похибки дозування зазорів у елементах запірних пристроїв, технологічних неточностей розмірів та форми взаємного розташування елементів кінематичних пар і ланок приводу дозатора.

Ключові слова: дозатор, точність дозування, систематична похибка, первинні похибки, в'язкі продукти.

Выполнено исследование влияния на величину систематической погрешности дозирования зазоров в элементах запорных устройств, технологических неточностей размеров и формы взаимного расположения элементов кинематических пар и звеньев привода дозатора.

Ключевые слова: дозатор, точность дозирования, систематическая погрешность, первичные погрешности, вязкие продукты.

Research of influence on the size of systematic error dosage the gaps in the elements of plug-forming devices, technological inaccuracies of sizes and location of the elements in kinematics pair in the drive of metering device.

Keywords: metering device, exactness of dosage, systematic error, primary errors, viscid products.

Точність дозування — одна з найважливіших характеристик будь-якого дозатора, це його властивість забезпечувати при заданих законах руху вхідних ланок розташування і рух вихідних ланок із похибками, що не перевищують їх допустимі значення.

До точності дозування встановлюється ряд вимог, які залежать від виду продукту і величини його дози. На неї також можуть впливати безліч чинників, таких як ступінь заповнення бункера, нерівномірність подачі продукту в дозуючий механізм, характер взаємодії продукту з механізмами самого дозатора, зміна властивостей продукту в процесі дозування під впливом зовнішніх чинників тощо. Поряд із цим через неточність виготовлення і складання, зазори в кінематичних парах,

через деформації ланок і зміну швидкості вхідної ланки положення, швидкість і прискорення вихідних ланок відрізняються від ідеальних, що також впливає на точність дозування. Різниця в кінематичних параметрах і позицію ванні веденої ланки обумовлена в основному технологічними неточностями розмірів, форми взаємного розташування елементів кінематичних пар і ланок, тобто первинними похибками, експлуатаційними похибками, динамічними похибками, а також структурними похибками.

Похибкою дозування називають різницю між дійсним і розрахунковим (ідеальним) значенням виділеної дози продукту. Оцінка точності роботи дозатора проводиться в процентному співвідношенні від її заданого номінального значення дози.

© С.В. Токарчук, О.М. Гавва, 2010

Абсолютна похибка дозування визначається як:

$$\Delta = \Delta_{\text{сист}} + \Delta_{\text{вип}}, \quad (1)$$

де $\Delta_{\text{сист}}$ — систематична похибка дозування; $\Delta_{\text{вип}}$ — випадкова похибка дозування.

Систематична похибка вимірювання — похибка, що здебільшого залишається постійною або що закономірно змінюється при повторних вимірюваннях і залежить від технічного виконання дозувальної системи. Випадкова похибка — похибка змінна (за величиною і за знаком) від вимірювання до вимірювання і залежить від суб'єктивних і об'єктивних факторів взаємодії продукції із технічною системою дозування і виконанням своїх функцій оператором.

Сучасні методи розрахунку похибок, їх вплив на кінематику і динаміку механічних систем, методи їх зменшення і компенсації, а також основні задачі точнісного аналізу і синтезу механізмів базуються на теорії точності механізмів, теорії ймовірності і математичної статистики [2].

В деяких конструктивних виконань дозувальних пристроїв при виконанні порівняльних розрахунків, потрібно визначати похибку переміщення ланок механізму, під якою розуміють різницю переміщення ведених ланок дійсного і ідеального механізмів при однакових переміщеннях їх ведучих ланок.

Якщо похибки переміщення відтворюються при одному і тому ж положенні ведучої ланки, але при різних напрямках його руху то вираз

$$\Delta_{\text{пр}} = \Delta\psi_{\text{к}} - \Delta\psi_{\text{п}}, \quad (2)$$

де $\Delta\psi_{\text{пр}}$ — похибка переміщення веденої ланки механізму, $\Delta\psi_{\text{п}}$ — похибка на початку переміщення веденої ланки, $\Delta\psi_{\text{к}}$ — похибка на кінці переміщення веденої ланки, визначає вільний (мертвий) хід механізму, який виникає внаслідок зазорів у кінематичних парах або пружної деформації ланок.

Для визначення величин систематичних похибок використаємо аналітичний метод аналізу точності механізмів. Позначимо координату веденої ланки ідеального механізму ψ_0 , а координату ведучої ланки — ψ і значення матричних параметрів ланок — q_j , де $j = 1, 2, \dots$ — порядковий номер ланки. Координати ψ_0 і ψ можуть бути лінійними і кутовими.

В ідеальному механізмі з голономними зв'язками координата ψ_0 має функціональну залежність від багатьох змінних (але не швидкостей):

$$\psi_0 = \psi_0(\varphi, q_1, q_2, \dots, q_n), \quad (3)$$

де параметри q_1, q_2, \dots, q_n повністю визначають розміри, форму і взаємне розташування ланок механізму. Через наявність первинних похибок Δq_j параметри дійсного механізму відрізняються від ідеальних значень, а тому положення дійсного механізму визначається координатою

$$\psi = \psi_0 + \Delta\psi_{\text{вм}} = \psi(\varphi + \Delta\varphi, q_1 +$$

$$+ \Delta q_1, + \dots, + q_n + \Delta q_n), \quad (4)$$

де $\Delta\psi_{\text{вм}}$ — похибка положення веденої ланки дійсного механізму, $\Delta\varphi$ — похибка положення його ведучої ланки.

Похибка Δq_j здебільшого не більша допусків на розміри ланок, тобто незначна порівняно із значеннями параметрів q_j . Врахувавши відносно малі значення $\Delta\varphi$ і Δq_j , розкладемо функцію в ряд Тейлора і, обмежуючись тільки нульовими і лінійними його членами, одержимо:

$$\psi = \psi_0 + \Delta\psi_{\text{вм}} = \psi_0(\varphi, q_1, \dots, q_n) + \left(\frac{\partial\psi}{\partial\varphi} \right)_0 \Delta\varphi + \sum_{j=1}^n \left(\frac{\partial\psi}{\partial q_j} \right)_0 \Delta q_j, \quad (5)$$

звідки знайдемо наближений вираз для визначення похибки положення дійсного механізму:

$$\Delta\psi_{\text{вм}} = \left(\frac{\partial\psi}{\partial\varphi} \right)_0 \Delta\varphi + \sum_{j=1}^n \left(\frac{\partial\psi}{\partial q_j} \right)_0 \Delta q_j. \quad (6)$$

Похибка положення дійсного механізму із ідеальною схемою:

$$\Delta\psi = \sum_{j=1}^n \left(\frac{\partial\psi}{\partial q_j} \right)_0 \Delta q_j, \quad (7)$$

похибка положення, викликана тільки однією первинною похибкою Δq_k параметра q_k :

$$\Delta\psi_k = \sum_{j=1}^n \left(\frac{\partial\psi}{\partial q_k} \right)_0 \Delta q_k. \quad (8)$$

Виходячи із наведених міркувань можна зробити висновок, що часткова похідна:

$$\left(\frac{\partial\psi}{\partial q_k} \right)_0 = \frac{\Delta\psi_k}{\Delta q_k}, \quad (9)$$

і є передаточним відношенням похибки $\Delta\psi_k$ від веденої ланки до ланки q_k , що містить похибку Δq_k .

Практичне застосування наведеної методики визначення похибки розглянемо на прикладі конструктивної схеми поршневого дозатора. Для в'язких та пластичних продуктів (рис. 1) та визначимо величину систематичної похибки під час дозування, прийнявши припущення про незалежність дії первинних похибок.

Для даної схеми $q_i = f(a, b, \alpha, \beta)$

$$\Delta X_C = (\Delta X_C)_a + (X_C)_b + (\Delta X_C)_\alpha + (\Delta X_C)_\beta \quad (10)$$

Для визначення похибки переміщення веденої ланки механізму запишемо рівняння для визначення координати X_C :

$$X_C = b \cos \beta \pm a \sin \alpha, \quad (11)$$

де «+» — для I четверті системи координат; «-» — для II четверті системи координат (рис. 1).

Для подальших розрахунків використаємо співвідношення:

$$\beta = \arcsin\left(\frac{a \cdot \cos \alpha - h}{b}\right). \quad (12)$$

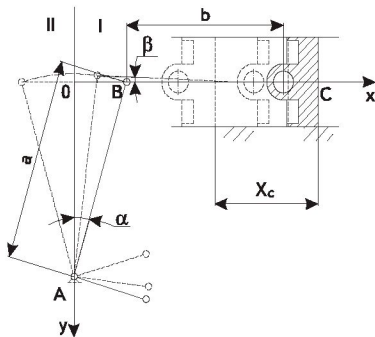


Рис. 1. Конструктивна схема поршневого дозатора для в'язких та пластичних харчових продуктів:
d — діаметр поршня; a, b — довжини відповідних ланок; α, β — кути при вершинах відповідних ланок; X_c — переміщення веденої ланки механізму

Похибка переміщення від неточності довжини коромисла a:

$$(\Delta X_c)_a = \frac{\partial X_c}{\partial a} \cdot \Delta a, \quad (13)$$

де Δa — похибка довжини коромисла (враховує допуск на лінійні розміри та граничні відхилення у посадках кінематичних пар)

$$(\Delta X_c)_a = \pm \sin \alpha \cdot \Delta a. \quad (14)$$

Похибка від неточності довжини шатуна b:

$$(\Delta X_c)_b = \frac{\partial X_c}{\partial b} \cdot \Delta b, \quad (15)$$

де Δb — похибка довжини шатуна (враховує допуск на лінійні розміри та граничні відхилення у посадках кінематичних пар).

$$(\Delta X_c)_b = \cos \beta \cdot \Delta b. \quad (16)$$

Похибка від положення кута α коромисла:

$$(\Delta X_c)_\alpha = \frac{\partial X_c}{\partial \alpha} \cdot \Delta \alpha, \quad (17)$$

$$(\Delta X_c)_\alpha = \pm a \cdot \cos \alpha \cdot \Delta \alpha. \quad (18)$$

Похибка від положення кута β шатуна:

$$(\Delta X_c)_\beta = \frac{\partial X_c}{\partial \beta} \cdot \Delta \beta, \quad (19)$$

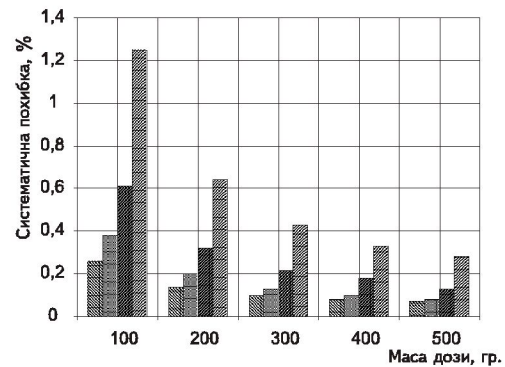
$$(\Delta X_c)_\beta = -b \cdot \sin \beta \cdot \Delta \beta. \quad (20)$$

Тоді загальна похибка положення веденого елемента механізму визначатиметься за формулою:

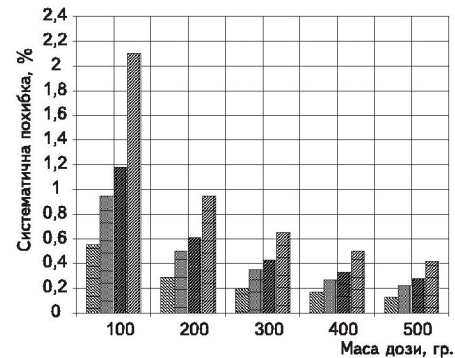
$$\begin{aligned} \Delta X_c = & (\Delta X_c)_a + (\Delta X_c)_b + (\Delta X_c)_\alpha + \\ & + (\Delta X_c)_\beta = \pm \sin \alpha \cdot \Delta a + \cos \beta \cdot \Delta b \pm \\ & \pm a \cos \alpha \cdot \Delta \alpha - b \sin \beta \cdot \Delta \beta. \end{aligned} \quad (21)$$

Величина похибки визначається виходячи з наступних умов: деталі дозатора (шатун, коромис-

ло) виконані за 7 – 10 квалітетом; у кінематичних парах застосовано посадки з зазором, 7 – 10 квалітет (посадки H7/f7, H78/f8, H9/f9, H9/f9 призначені для підшипників ковзання) [1]; величина похибки дозування для сучасного пакувального обладнання складає ±1% (відповідно систематична похибка має знаходитись на рівні ≈0,1%) від величини дози продукту [5]; Результати розрахунків представлено у вигляді графіків (рис. 2). Встановлено, що при використанні у якості виконавчого механізму дозатора кривошипно-шатунного механізму точність виготовлення його ланок та кінематичних пар має бути не нижче 7 – 8 квалітету при відповідних посадках.



а



б

Рис. 2. Характер залежності систематичної похибки дозування від точності виготовлення елементів дозатора за різних мас дози продукту:

а — граничні відхилення мінімальні; б — граничні відхилення максимальні; 1 – 7 квалітет; 2 – 8 квалітет; 3 – 9 квалітет; 4 – 10 квалітет

Переміщення продукту в споживчу тару здійснюється через вихідний канал поршневого дозуючого пристрою (рис. 3). При цьому може спостерігатися і деяке просочування продукту через зазори, яку утворюються між елементами запірних систем та корпусом дозатора.

Оскільки поперечний розмір щілини малий, а в'язкість продукту велика, течію в щілині можна вважати повзучою плоскою [4]. Для спрощення розрахунків вважатимемо, що рух продукції в щілині сталій і тоді можна нехтувати інерційністю продукту.

Розподіл швидкостей у шарі продукту визначається рівнянням:

$$V_x = \frac{1}{2 \cdot \mu} \cdot \frac{dp}{dx} \cdot y^2 + C_1 \cdot y + C_2, \quad (22)$$

де x і y — координати по довжині та ширині щілини, k — величина динамічної в'язкості продукції.

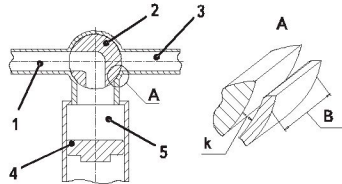


Рис. 3. Принципова схема поршневого дозуючого пристрою з крановою запірною арматурою: 1 — вихідний канал; 2 — крановий запірний пристрій; 3 — вхідний канал; 4 — поршень; 5 — мірний циліндр; k — висота зазору; B — ширина зазору

Ввівши граничні умови:

$$V_x = 0, V_y = 0 \text{ при } y = 0,$$

$$V_x = 0, V_y = 0 \text{ при } y = k,$$

де k — висота щілини, визначаємо сталі C_1, C_2 підставляючи граничні умови у рівняння (22):

$$C_1 = -\frac{k}{2 \times \mu} \cdot \frac{dp}{dx}, C_2 = 0.$$

Закон розподілу швидкості продукту вздовж щілини буде описуватись рівнянням [3]:

$$V_x = \frac{1}{2 \times \mu} \cdot \frac{dp}{dx} \cdot y^2 - \frac{k}{2 \times \mu} \cdot \frac{dp}{dx} \cdot y = \frac{1}{2 \times \mu} \cdot \frac{dp}{dx} \cdot y \cdot (y - k). \quad (23)$$

Використавши рівняння (23) можна визначити питому витрату продукту за умови, що основний рух відбувається у напрямку руху середовища, тобто вздовж поверхні щілини:

$$q = -\int_0^k V_x \cdot dy = -\int_0^k \frac{1}{2 \times \mu} \cdot \frac{dp}{dx} \cdot y \cdot (y - k) dy = -\frac{1}{2 \times \mu} \cdot \frac{dp}{dx} \cdot \left(\int_0^k y^2 dy - \int_0^k y \cdot h dy \right) = \frac{k^3}{12 \cdot \mu} \cdot \frac{dp}{dx}. \quad (24)$$

З даного рівняння можна визначити повні витрати продукту через щілину, прийнявши, що витрата визначається як добуток питомої витрати на ширину щілини:

$$dp = \frac{12 \cdot Q_{\text{вхщ}} \cdot \mu}{k^3 \cdot d} dx, \quad (25)$$

тобто

$$Q_{\text{вхщ}} = \frac{k^3}{12 \cdot \mu \cdot B_{\text{вхщ}}} \cdot d_{\text{вхщ}} \cdot (P_{\text{вхщ}} - P_{\text{вихщ}}), \quad (26)$$

де $Q_{\text{вхщ}}$ — витрата продукту через щілину; $B_{\text{вхщ}}$ — довжина щілини; $k_{\text{вхщ}}$ — висота щілини; $P_{\text{вхщ}}$ — тиск на вході у щілину; $P_{\text{вихщ}}$ — тиск на виході із щілини.

Кількість продукту, що перемістилася з мірного циліндра через щілину, визначатиметься виразом:

$$Q_{\text{в}} = Q_{\text{вхщ}} \cdot t_{\text{доз}}, \quad (27)$$

де $t_{\text{доз}}$ — час виштовхування продукту з мірного циліндра.

Під час розрахунків приймаємо, що ширина продукту у щілині дорівнює ширині кранового запірного пристрою. Тиск на вході у щілину буде визначатись за формулою:

$$P_{\text{вхщ}} = \Delta P_{\text{п}} - \Delta P_{\text{1вх}} - \Delta P_{\text{мвих}}, \quad (28)$$

де $\Delta P_{\text{п}}$ — тиск, що створюється поршнем; $\Delta P_{\text{1вх}}$ — падіння тиску у випускному каналі; $\Delta P_{\text{мвих}}$ — падіння тиску за рахунок звуження випускного каналу.

Визначивши величини тиску на вході та виході із щілини, маємо змогу визначити витрати продукту через щілину між крановою запірною арматурою та корпусом. Знаючи тривалість процесу дозування та витрату продукції через щілину, можна визначити, яка кількість продукту не поступить у споживчу тару. Використавши рівняння (27), визначимо похибку дозуючого пристрою для різних типів в'язких продуктів (рис. 4).

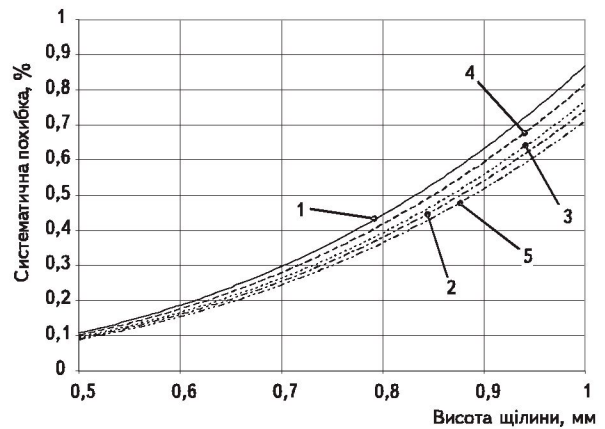


Рис.4. Характер залежності між систематичною похибкою дозування в'язкого продукту та величиною щілини (маса дози 250 гр.): 1 — згущене молоко; 2 — вершки; 3 — сир плавлений «Дружба»; 4 — сир плавлений «Хрещатик»; 5 — майонез «Оливковий»

Висновки. На основі виконаних досліджень встановлено характер залежності систематичної похибки дозування від точності виготовлення виконавчих механізмів дозатора за різних мас дози продукту. При використанні кривошипно-шатунного механізму у якості виконавчого механізму дозатора точність виготовлення його ланок та кінематичних пар має бути не нижче 7 – 8 квалітету при відповідних посадках. Весь продукт, витиснений в процесі виштовхування з порожнини мірного циліндра у впускний канал, складе похибку у вели-

чині дози. Таким чином, чим менше буде ця похибка, або, що теж саме, чим менше буде витрата через впускний канал, тим точнішою буде відміряна доза. Знаючи властивості фасованого продукту, що фасується, а також конструктивні параметри дозатора можна на підставі одержаних аналітичних залежностей визначити величину витоків продукту або відхилення дози від заданого значення на етапі дозування продукції; можливе вирішення і зворотного завдання: знаючи реологічні властивості продукту, що фасується, і необхідну точність дозування, на основі проведених розрахунків можна визначити величину допустимого зазору між поверхнями крана та корпусу циліндра, що дасть можливість усунути вихід продукції у подавальний канал.

ЛІТЕРАТУРА

1. *Анурьев В.И.* Справочник конструктора-машиностроителя в 3-х т. — М.: Машиностроение. — 1968. — Т.1 — 726 с.
2. *Гавва О.М.* Пакувальне обладнання: в 3-х т. / О.М. Гавва, А.П. Беспалько, А.І. Волчко. — ІАЦ «Упаковка». — 2008. — 1 т.: Обладнання для пакування продукції у споживчу тару. — 436 с.
3. *Литвинов В.Г.* Движение нелинейно-вязкой жидкости. — М.: Наука. — 1982. — 376 с.
4. *Мачихин Ю.А.* Инженерная реология пищевых материалов. — М: Легкая и пищевая промышленность. — 1981. — 216 с.
5. *Пашков Е.В.* Промышленные механотронные системы на основе пневмопривода: Учеб. пособие/Е.В. Пашков, Ю.А. Осинский. — Севастополь: Изд-во СевНТУ. — 2007. — 401 с.

Одержано редколегією 16.01.2010