

УДК 621.798:004.94

SYNTHESIS OF DESIGN PARAMETERS OF A DEVICE FOR PACKAGING LOOSE PRODUCTS WITH A CONTINUOUS CUP-TYPE ADAPTRONIC DOSING MODULE

O. Gavva, L. Kryvoplias-Volodina
National University of Food Technologies

Key words:

packaging device,
dosing module,
loose products,
cup dispenser,
movement trajectory,
kinematic and power
parameters,
structural parameters

Article history:

Received 21.04.2025
Received in revised form
14.05.2025
Accepted 21.11.2024

Corresponding author:

krivoplyas-volodina@ukr.net

ABSTRACT

For dosing fast-moving bulk products, cup-type dispensers are widely used, which provide volumetric dose formation. Obtaining high productivity values involves the use of adaptronic continuous dosing and packaging modules. In such modules, the operation of forming a dose of product and the operation of packing, i.e., moving it into consumer packaging, are combined in time. The main limiting component of the duration of the kinematic packing cycle is the duration of movement of loose products in the product pipeline of the packing device. The design of the product pipeline (funnel) of the packaging device significantly affects the additional resistance to product movement when it comes into contact with the inner surface of the funnel and possible mutual impact processes between product particles.

The object of the study was a packaging device made in the form of conjugated conical and cylindrical parts. Studies have established that with a corresponding eccentric arrangement of the cylindrical part relative to the conical axis, it is possible to increase the effective cross-sectional area of the conjugation of the conical and cylindrical parts and reduce the probability of impact interaction of particles of loose products on the inner surface of the cylindrical part of the packing device. A mathematical expression was obtained that made it possible to determine the rational value of the diameter of the conical part of the device, taking into account the continuous operation mode of the adaptronic-functional dosing and packaging module. Based on the results of mathematical modeling of the movement of a material particle in the product pipeline of the packing device, an expression was obtained to determine the rational value of the eccentricity of the packing device and the effective cross-sectional area of the funnel at the junction of the conical and cylindrical parts. It has been established that the eccentricity can be both positive and negative with respect to the axis of the conical part and depends on the rotor rotation frequency. To minimize the dimensions and weight of the packing device, it is recommended to make its conical part in the form of a torus.

DOI: 10.24263/2225-2916-2025-37-14

СИНТЕЗ КОНСТРУКТИВНИХ ПАРАМЕТРІВ ПРИСТРОЮ ФАСУВАННЯ СИПКОЇ ПРОДУКЦІЇ АДАПТРОННОГО МОДУЛЯ ДОЗУВАННЯ БЕЗПЕРЕРВНОЇ ДІЇ СТАКАНЧИКОВОГО ТИПУ

О. О. Гавва, аспірант, ORCID ID: 0009-0004-4979-7943

Л. О. Кривопляс-Володіна, д-р техн. наук, ORCID ID: 0000-0001-9906-6381

Національний університет харчових технологій

Ключовою компонентою тривалості кінематичного циклу фасування є тривалість переміщення сипкої продукції в продуктопроводі фасувального пристрою модуля дозування та фасування. Завдання скорочення тривалості фасування безпосередньо пов'язано із задачами раціонального проектування фасувальних пристроїв. Проведено теоретичні дослідження руху легко плинної сипкої продукції в каналах фасувального пристрою при безперервній роботі дозувального модуля, побудованого за роторною системою компоновання. Для забезпечення безперервної роботи функціонального модуля дозування одержано математичний вираз, який надає можливість визначити раціональне значення діаметра конусної частини лійки. На основі математичного моделювання руху матеріальної частинки в продуктопроводі фасувального пристрою одержано вираз для визначення раціонального значення ексцентриситету фасувального пристрою й ефективної площі поперечного перерізу лійки в місці спряження конічної та циліндричної частин фасувального пристрою. Для мінімізації габаритів фасувального пристрою рекомендовано виконати його конічну частину у вигляді тороподібної форми.

Ключові слова: пристрій фасування, модуль дозування, сипка продукція, стаканчиковий дозатор, траєкторія переміщення, кінематичні параметри, конструктивні параметри.

Вступ. Пакування сипкої харчової продукції у споживчу тару передбачає виконання основних операцій дозування та фасування. Залежно від фізико-механічних властивостей сипкої продукції формування дози із масиву продукції здійснюють такими основними способами: об'ємним, ваговим, комбінованим, комбінаційним. Конструктивне виконання адаптронних модулів дозування та фасування умовно поділяє способи дозування на види, підвиди. Для дозування легко плинної сипкої продукції, величиною дози від 50 г до 3 кг, широко використовують дозатори з мірними телескопічними місткостями (телескопічні стаканчики). Компоновання і принцип роботи таких дозаторів у пакувальних машинах-автоматах здебільшого залежить від продуктивності. Продуктивність — це обернено пропорційна величина тривалості кінематичного циклу процесу пакування.

Кінематичний цикл залежить від режиму роботи як пакувальної машини-автомата загалом, так і режимів роботи кожного окремого адаптронного модуля. Для одержання продуктивності великих значень (від 90 доз за хвилину до 150 доз за хвилину) використовують адаптронні модулі дозування безперервної дії. В таких дозаторах операція формування дози продукції й операція фасування, тобто переміщення її у споживчу тару, суміщені в часі, тому тривалість кінематичного циклу фасування дорівнює сумі тривалостей відкриття заслінки стаканчика, переміщення продукції зі стаканчика в споживчу тару, подачі та відведення споживчої тари. Основною частиною тривалості кінематичного циклу фасування є тривалість переміщення сипкої

продукції в лійці фасувального пристрою. Конструктивне виконання лійки фасувального пристрою впливає на додаткові опори переміщення продукції при контакті її з внутрішньою поверхнею лійки та можливих взаємодійних процесів між частинками продукції, тому завдання скорочення тривалості фасування продукції, що призведе до підвищення продуктивності модуля і всієї пакувальної машини, безпосередньо пов'язане із задачами раціонального проєктування фасувальних пристроїв.

Огляд останніх досліджень і публікацій. При розробленні, випробуваннях й експлуатації пакувальних машин виникає завдання визначення оптимальних значень конструкційних і технологічних параметрів, раціональних експлуатаційних режимів, що забезпечують надійне функціонування машини при дії на неї множини дестабілізаційних факторів [1]. Одним із підходів до створення новітніх пакувальних машин є технологія паралельного інжинірингу [2].

Розвиток цього підходу базується на використанні раніше накопиченого досвіду під час проєктування нового пакувального обладнання та розроблення методів пошукового структурно-параметричного його синтезу.

Пошукова задача структурно-параметричного синтезу під час розроблення нової пакувальної машини виникає на концептуальній стадії проєкту, тобто на етапі зовнішнього проєктування [3].

У науковій праці [4] наведено методологічні засади компонування машин для пакування сипкої продукції у споживчу тару на основі функціональних модулів. Розглянуто також структурні схеми як пакувальних машин, так і їх функціональних модулів. Встановлено, що для забезпечення виконання функціональної точності мехатронним модулем, високих значень продуктивності потрібно досконало дослідити переміщення продукції у всіх продуктових каналах модуля із визначенням параметрів, що надають можливість виконати раціональне конструювання робочих органів. У наукових працях [5, 6] наведено результати дослідження переміщення сипкої продукції у вагових дозаторах, сформульовані завдання на підвищення ефективності роботи таких дозаторів. Процесам переміщення сипкої продукції із місткостей присвячена праця [7], поряд із цим у дослідженнях не враховані режимні умови роботи дозаторів. Оптимізація параметрів вагового дозування сипкої продукції та розроблення методології потокового контролю точності дозування наведено в працях [8, 9]. Дослідженням переміщення сипкої продукції по гравітаційних поверхнях присвячена праця [10]. Питанням інтенсифікації переміщення дрібнодисперсної сипкої продукції при дії вібраційних навантажень присвячена праця [11]. Однак у цих дослідженнях відокремлено розглядається рух сипкої продукції без врахування режимів руху продукції в попередньо виконуваних технологічних операціях. Питанням удосконалення дозаторів об'ємного типу для сипкої продукції присвячені праці [13—15]. Розуміння механізмів виникнення небажаних ефектів є важливим для проєктування надійних та ефективних систем транспортування харчових інгредієнтів. Фізико-механічне моделювання допомагає розробляти гігієнічні системи дозування, що відповідають сучасним промисловим стандартам [15]. Значна частина сучасних досліджень орієнтована на використання методу дискретних елементів (DEM) для моделювання гранульованих потоків у бункерах і шибєрних дозаторах. Вплив тиску рухомого зернистого шару на стінки бункера, детально розглянутий у [16], уточнено з позицій навантаження конструкцій приводів, що є важливим для раціонального проєктування елементів фасувального пристрою. Розробки, представлені у праці [17], обґрунтовують флуктуації сили у двовимірному потоці сипких матеріалів, зважаючи на важливість

імпульсного навантаження при проектуванні дозувальних систем. У праці [18] автори встановили кореляцію між структурою потоку і тиском на стінку в повномасштабному силосі. Вагомий внесок у розуміння розподілу швидкостей і характеру потоку внесли у [19], де проаналізовано поведінку частинок під час заповнення та розвантаження бункерів. Завдяки введенню поняття локального масового потоку, у [20] здійснили вдосконалення САД підходу фізико-механічного моделювання, що сприяє більш точному прогнозуванню швидкості переміщення частинок уздовж внутрішніх поверхонь бункера. Окрема увага приділяється дослідженню дозаторів шибєрного типу, зокрема в частині взаємодії частинок під час проходження через вузькі отвори. Результати експериментів [21] довели, що форма частинок має вирішальне значення для оцінки продуктивності та рівномірності потоку. У [22] розроблено тривимірну модель гвинтового живильника з урахуванням ефекту форми частинок, яка дала змогу наблизити результати моделювання до реальних умов. З'ясовано, що форма витків і кут нахилу істотно впливають на зону захоплення і стабільність потоку. Результати цих досліджень направлені на підвищення точності дозування. Попри значний обсяг наукових досліджень, спрямованих на розкриття складних фізичних явищ, що визначають динаміку сипких харчових продуктів, поточний рівень знань не забезпечує достатньої бази для розробки вичерпних інженерних рекомендацій. Це обмежує можливість створення універсальних та оптимальних систем транспортування і дозування зазначених матеріалів.

Мета досліджень: визначити й обґрунтувати раціональну конструкцію фасувального пристрою для сипкої продукції в пакувальних машинах-автоматах безперервної дії зі стаканчиковими дозаторами.

Відповідно до мети сформульовано такі завдання:

- проаналізувати кінематичні параметри руху частинок сипкої продукції у фасувальному пристрої;
- визначити вплив зміщення центральної циліндричної частини лійки щодо конусної частини на ефективну площу поперечного перерізу руху продукції та тривалість переміщення;
- надати практичні рекомендації щодо значення ексцентриситету в лійці залежно від продуктивності дозувально-фасувального модуля.

Матеріали і методи. *Об'єктом дослідження* є фасувальний пристрій адаптронного модуля дозування сипкої продукції стаканчикового типу безперервної дії.

Предмет дослідження — кінематичні параметри руху матеріальних частинок сипкої продукції в продуктопроводі фасувального пристрою, його конструкція та конструктивні параметри.

Методами дослідження є математичне моделювання руху легко плинної сипкої продукції в продуктопроводі фасувального пристрою різного конструктивного виконання та синтез його конструкційних параметрів.

Результати дослідження. Здебільшого конструкція фасувального пристрою є поєднанням конічної й циліндричної частин продуктопроводу. Циліндрична частина має діаметр рукава плівки, з якого виготовляють упаковку, або еквівалентна розміру поперечного перерізу іншої упаковки (пачки, банки, коробки), а конічна — діаметр, що відповідає дузі руху стаканчика в зоні фасування. Кут нахилу бічної поверхні конуса приймається залежно від режиму руху сипкої продукції (нормальний, гідравлічний, суцільний). Для реалізації детермінованого гідравлічного режиму переміщення сипкої продукції рекомендують приймати кут нахилу конусної поверхні в межах $60^\circ \dots 70^\circ$. Довжина фасувального пристрою визначається його компонованням

залежно від діаметрів конусної та циліндричної частин, кута нахилу конусної поверхні та розташуванням і структурою модуля подачі плівки, формування з неї упаковки або розташуванням подавальної транспортної системи для інших видів упаковки.

Технологічна тривалість фасування визначається тривалістю переміщення продукції із дозувального стаканчика в конусну частину фасувального пристрою, переміщення в конусній і циліндричній частинах лійки (рис. 1).

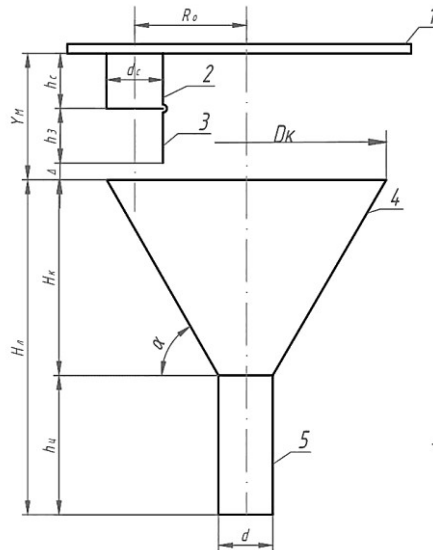


Рис. 1. Схема фасувального пристрою для сипкої продукції модуля дозування безперервної дії: 1 — бункер із сипкою продукцією; 2 — стаканчикова мірна ємність; 3 — заслінка; 4 — конічна частина лійки; 5 — циліндрична частина лійки

В оптимальному варіанті сипка продукція має переміщатися вертикально. Опором такому переміщенню є аеродинамічний опір повітря або газового середовища, в якому знаходиться продукція. Однак для дозаторів безперервної дії таке переміщення продукції реалізувати неможливо.

Частина продукції буде проковзуватися по внутрішній поверхні конуса лійки. Поряд із цим можливий силовий контакт продукції по внутрішній поверхні циліндричної частини фасувального пристрою. Це може призвести до турбулентності руху, співударів частинок. Таке явище збільшує тривалість фасування і, відповідно, зменшує продуктивність модуля. Для усунення цих недоліків є кілька способів, одним із яких є проектування раціональної конструкції фасувального пристрою. Загальновідомо, якщо змістити циліндричну частину лійки відносно конічної, то в зоні спряження отримаємо збільшену ефективну площу поперечного перерізу руху сипкої продукції (рис. 2).

Із геометричних залежностей відомо, що для поперечного перерізу циліндричної труби ефективна площа переміщення продукції визначається:

$$F_{\text{еф}} = \frac{\pi d^2}{4}, \quad (1)$$

а для перерізу у вигляді еліпса:

$$F'_{ef} = \frac{\pi d}{4} \sqrt{d^2 + 4(e \cdot \operatorname{tg} \alpha)^2}, \quad (2)$$

де F_{ef} , F'_{ef} — ефективні площі переміщення продукції по циліндричному і, відповідно, еліпсоїдному спряженні; d — внутрішній діаметр циліндричної частини лійки; e — ексцентриситет зміщення циліндричної частини лійки відносно конічної.

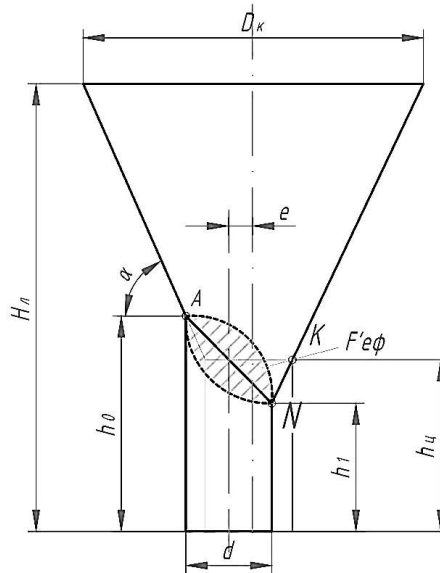


Рис. 2. Схема лійки фасувального пристрою із зміщеною циліндричною частиною

Величина ексцентриситету залежить від кутової швидкості обертання ротора дозатора, радіуса ротора, продуктивності та геометричних параметрів конічної і циліндричної частин лійки фасувального пристрою.

Важливим конструктивним параметром фасувального пристрою, яким забезпечується безперервний режим фасування сипкої продукції при заданій продуктивності, є діаметр конусної частини лійки D_k . Під час визначення раціонального значення D_k потрібно враховувати тривалість переміщення сипкої продукції із стаканчика у споживчу упаковку, кількість стаканчиків у дозаторі та частоту обертання ротора дозувального модуля (рис. 3).

Визначення діаметра конусної частини лійки виконаємо із застосуванням основних положень геометрії щодо довжини хорди oa або ob при заданому радіусі розташування стаканчиків $D_p/2$ та центральному куту φ_Σ :

$$D_k = 2D_p \cdot \sin(0,5\varphi_\Sigma),$$

де φ_Σ — сумарний центральний кут визначається як:

$$\varphi_\Sigma = 0,5\varphi_\phi + 0,5\varphi_{np} + \varphi_c + 0,5\Delta\varphi;$$

φ_ϕ — кут, на який повернеться ротор стаканчиків, за якого вся продукція із стаканчика переміститься в упаковку:

$$\varphi_\phi = \omega_p \cdot t_\phi;$$

ω_p — кутова швидкість ротора, визначається $\omega_p = \frac{\pi \cdot n_p}{30}$; n_p — частота обертання

ротора, визначається $n_p = \frac{Z}{m_0}$; Z — продуктивність дозувально-фасувального модуля; m_0 — кількість стаканчиків у роторі модуля дозування; t_ϕ — тривалість фасування-переміщення сипкої продукції із стаканчика в упаковку.

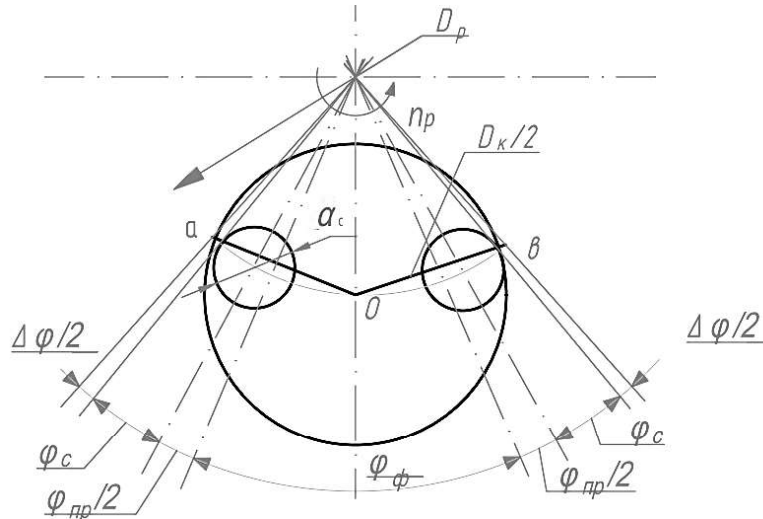


Рис. 3. Схема до визначення раціонального значення діаметра D_k конусної частини лійки

Для проектних розрахунків та прийнявши гідравлічний режим переміщення сипкої продукції тривалість фасування можна визначити як:

$$t_\phi = k_1 \cdot \lambda \sqrt{\frac{2H_\Sigma}{g}},$$

де k_1 — коефіцієнт, що враховує переміщення частинок сипкої продукції по внутрішній поверхні лійки та можливі співударні явища між частинками; λ — коефіцієнт аеродинамічного опору переміщенню частинок у продуктопроводі лійки; H_Σ — довжина шляху переміщення сипкої продукції $H_\Sigma = h_c + Y_m + H_n$; ϕ_{np} — кут повороту ротора, що відповідає тривалості переміщення рукава плівки на довжину упаковки або подачі порожньої упаковки:

$$\phi_{np} = \omega_p \cdot t_{np} = \omega_p \cdot L_{yn} / v_{np},$$

де L_{yn} — довжина упаковки; v_{np} — швидкість переміщення зварних і протягувальних пристроїв (для м'якої упаковки); ϕ_c — центральний кут ротора, що відповідає радіусу стаканчика; $\Delta\phi$ — кут, що адекватний технологічному зазору.

Одержане значення ϕ_Σ має бути меншим за кут розташування стаканчиків у роторі, тобто $2\phi_\Sigma < \phi_0$, де $\phi_0 = 2\pi / m_0$.

Для визначення раціонального значення ексцентриситету за умови, що частинки сипкої продукції не будуть вдарятися по внутрішній поверхні циліндричної частини лійки, доречно розглянути поетапно рух сипкої продукції із рухомого мірного стакана в упаковку.

Відповідно до проведених відеоспостережень встановлено, що при повороті ротора на кут φ_{Σ} здебільшого всі частинки сипкої продукції знаходяться в циліндричній частині фасувального пристрою, тому що $Y_M + H_k < h_{\text{ц}}$. Тобто найбільш несприятливі умови руху сипкої продукції (взаємодія із внутрішньою конусною поверхнею, удар по циліндричній частині лійки) будуть у частинок, що найбільш віддалені від геометричного центра лійки, тобто в точці М (рис. 4).

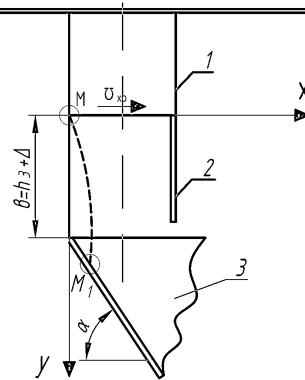


Рис. 4. Схема розрахунку переміщення частинки сипкої продукції на першому етапі руху:
1 — стаканчик; 2 — заслінка; 3 — конусна частина лійки

Для дослідження руху частинки сипкої продукції в продуктопроводі фасувального пристрою приймемо такі припущення: частинка сипкої продукції має масу, але геометричними розмірами її можна нехтувати; відповідно до фізико-механічних властивостей можна прийняти, що частинка є пружно-пластичною із коефіцієнтом відновлення швидкості після удару по конусній поверхні, який знаходиться в межах ($k=0,1 \dots 0,3$); впливом дії навколишніх частинок на рух досліджуваної частинки умовно також нехтуємо. Отримані значення ґрунтуються на даних з досліджень сипких харчових матеріалів, що демонструють пружно-пластичну поведінку.

З точки зору однорідності дії зовнішніх зусиль на частинку сипкої продукції, її рух у фасувальній лійці можна навести сукупністю чотирьох характерних етапів:

- перший — переміщення матеріальної частинки із початкової позиції (точка М) до контакту із внутрішньою конусною поверхнею лійки;
- другий — косий пружно-пластичний удар частинки по внутрішній поверхні конусної частини лійки;
- третій — переміщення матеріальної частинки по внутрішній поверхні конусної частини лійки;
- четвертий — переміщення матеріальної частинки в зоні спряження конусної і циліндричної частин лійки.

На першому етапі початок руху частинки розпочинається з моменту відкриття заслінки. Тривалість відкриття заслінки суттєво незначна порівняно з тривалістю інших етапів, тому можемо приймати, що відкриття заслінки відбувається миттєво. Всі частинки сипкої продукції рухаються із лінійною швидкістю v_{x0} , яка визначається

$$v_{x0} = \omega_p \frac{D_p}{2}.$$

Рух матеріальної частинки на першому етапі описується рівняннями:

$$\ddot{y} = g; \dot{y} = gt; y = g \frac{t^2}{2} \text{ при } t_n = 0; y_n = 0; \dot{y}_n = 0; \quad (3)$$

$$\dot{x} = v_{x0}; x = v_{x0} \cdot t \text{ при } t_n = 0; x_n = 0; \dot{x}_n = v_{x0}.$$

Якщо припустити, що проекція конусної поверхні лійки в системі координат XOY описується рівнянням $y = b + tg\alpha \cdot x$, то тривалість переміщення частинки сипкої продукції до конусної поверхні в точці M_1 можна визначити:

$$t_1 = \left[v_{x0} \cdot tg\alpha + \sqrt{(v_{x0} \cdot tg\alpha)^2 + 2gb} \right] / g. \quad (4)$$

Після підстановки виразу [4] для визначення t_1 в рівняння руху (3) матеріальної частинки одержимо:

$$\dot{y}_{1k} = g \cdot t_1; \quad y_{1k} = g \frac{t_1^2}{2}; \quad (5)$$

$$\dot{x}_{1k} = v_{x0}; \quad x_{1k} = v_{x0} \cdot t_1.$$

Координати y_{1k} та x_{1k} відповідають координаті точки M_1 , в якій відбувається удар частинки по внутрішній поверхні конусної частини лійки.

Враховавши траєкторію руху матеріальної частинки, її фізико-механічні властивості, можна стверджувати, що на другому етапі буде косий пружно-пластичний удар (рис. 5).

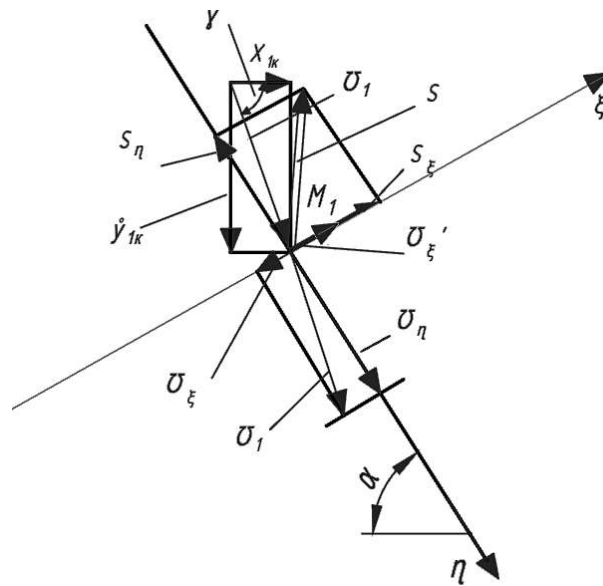


Рис. 5. Схема визначення кінематичних параметрів руху матеріальної частинки сипкої продукції після удару по внутрішній поверхні конічної частини лійки

Використавши ньютонівську теорію удару, запишемо вирази для визначення кінематичних параметрів руху частинки після удару:

$$v_n = v_1 \cdot \cos(\gamma - \alpha); \quad v_{\xi} = v_{\xi} \cdot k = v_1 \cdot \sin(\gamma - \alpha) \cdot k, \quad (6)$$

$$\text{де } v_1 = \sqrt{(\dot{y}_{1k})^2 + (\dot{x}_{1k})^2}; \quad \gamma = \arctg \left(\frac{\dot{y}_{1k}}{\dot{x}_{1k}} \right).$$

Після удару можливе відсакування частинки від поверхні конічної частини лійки з повторним ударом, але враховуючи, що для значної частини харчових продуктів k знаходиться в межах $0,1 \dots 0,3$, то значенням v'_ξ можна знехтувати, прийнявши подальший рух частинки тільки по поверхні конусної частини лійки. Під час удару виникають силові навантаження як на продукт, так і на стінку лійки. Силові ударне навантаження можна оцінити ударною силою або ударним імпульсом S . Ці параметри важливі під час вибору товщини матеріалу лійки і міцнісних властивостей продукції. На третьому етапі частинка рухається по поверхні конусної частини лійки з проковзуванням, яке враховується коефіцієнтом f опору ковзання. На цьому етапі переміщення відбувається від точки M_1 до точки A . Точка A характеризує початок циліндричної частини лійки (рис. 6).

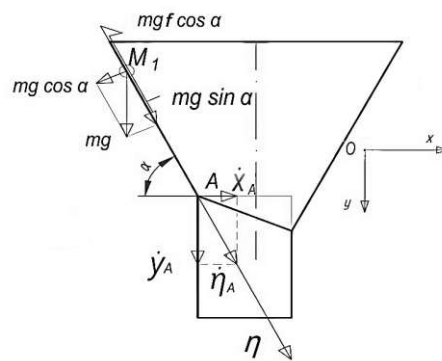


Рис. 6. Схема визначення кінематичних параметрів руху частинки сипкої продукції по внутрішній поверхні конічної частини лійки

Рівняння руху матеріальної частинки сипкої продукції по конусній частині лійки запишемо у вигляді:

$$\dot{\eta} = (g \cdot \sin \alpha - g \cdot \cos \alpha \cdot f) \cdot t + v_1 \cdot \cos(\gamma - \alpha); \quad (7)$$

$$\eta = (g \cdot \sin \alpha - g \cdot \cos \alpha \cdot f) \cdot 0,5 \cdot t^2 + v_1 \cdot \cos(\gamma - \alpha) \cdot t \quad (8)$$

при $t_n = 0$; $\eta = 0$; $\dot{\eta} = v_1 \cdot \cos(\gamma - \alpha)$,

де f – коефіцієнт тертя ковзання матеріальної частинки по внутрішній поверхні конусної частини лійки.

Прийmemo відстань від точки M_1 до A за l_{AM1} , яка залежить від кута α , v_{ox} та e . За таких умов:

$$t_2 = \left[-v_1 \cdot \cos(\gamma - \alpha) + \sqrt{[v_1 \cdot \cos(\gamma - \alpha)]^2 + 2l_{AM1} (g \cdot \sin \alpha - g \cdot f \cdot \cos \alpha)} \right] \times \\ \times [g \cdot \sin \alpha - g \cdot f \cdot \cos \alpha]^{-1}. \quad (9)$$

Тоді

$$\dot{\eta}_A = (g \cdot \sin \alpha - g \cdot f \cdot \cos \alpha) \cdot t_2 + v_1 \cdot \cos(\gamma - \alpha), \quad (10)$$

а проєкції на осі x та y :

$$\dot{x}_A = \dot{\eta}_A \cdot \cos \alpha; \quad \dot{y}_A = \dot{\eta}_A \cdot \sin \alpha. \quad (11)$$

У подальшому, на четвертому етапі, частинка переміщається в циліндричній частині лійки (рис. 7).

Рівняння, що описують рух матеріальної частинки в циліндричній частині лійки, мають вигляд:

$$x = \dot{x}_A \cdot t; \quad y = 0,5 \cdot t^2 \cdot g + \dot{y}_A \cdot t \quad \text{при } t = 0; \quad x = 0; \quad y = 0; \quad x = \dot{x}_A; \quad y = \dot{y}_A. \quad (12)$$

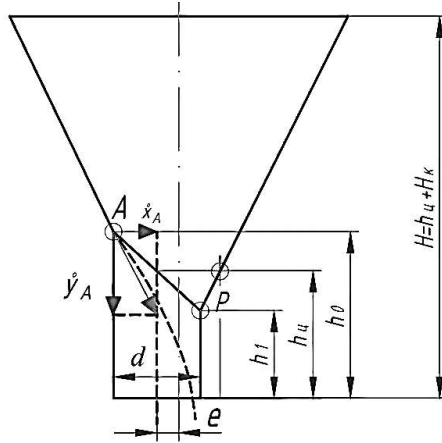


Рис. 7. Схема визначення кінематичних параметрів руху частинки сипкої продукції в циліндричній частині лійки

Тривалість переміщення частинки в циліндричній частині лійки можна визначити за формулою при $y = h_0$:

$$t_3 = \left[-\dot{y}_A + \sqrt{(\dot{y}_A)^2 + 2gh_0} \right] / g, \quad (13)$$

тоді

$$x_{h_0} = \dot{x}_A \cdot t_3; \quad y_{h_0} = 0,5 \cdot t_3^2 \cdot g + \dot{y}_A \cdot t_3.$$

На цьому етапі важливо, щоб матеріальна частинка не вдарялась по внутрішній поверхні циліндричної частини лійки і не проковзувалась по ній. Для виконання цієї умови потрібно, щоб виконувалась умова $x_{h_0} = \dot{x}_A \cdot t_3 \leq d$.

Виконання цієї умови можливе при відповідному ексцентриситеті циліндричної частини стосовно конічної.

Після відповідних математичних перетворень одержимо:

$$e = \left[\frac{H_k}{\sin \alpha} - \left[\left(\frac{\omega_p \cdot 0,5 D_p (\omega_p \cdot 0,5 D_p \cdot tg \alpha + \sqrt{(\omega_p \cdot 0,5 D_p \cdot tg \alpha)^2 + 2gb})}{g \cdot \cos \alpha} \right) + l_{AM1} \right] \right] \cos \alpha, \quad (14)$$

де

$$l_{AM1} = \left\{ \frac{d^2 \cdot g^2}{\left[-\dot{y}_A + \sqrt{(\dot{y}_A)^2 + 2gh_0} \right]^2 \cdot \cos^2 \alpha} - [v_1 \cdot \cos(\gamma - \alpha)]^2 \right\} \left[2(g \cdot \sin \alpha - g \cdot f \cdot \cos \alpha) \right]^{-1}.$$

Аналіз одержаного виразу показує, що за всіх інших сталих геометричних параметрів фасувального пристрою величина ексцентриситету залежить від частоти обертання ротора модуля дозування в параболічній залежності. Чим більша частота ротора, тим менше значення e (рис. 8).

При відповідних значеннях частоти обертання ротора ексцентриситет може бути від'ємним, тобто циліндрична частина лійки від осі симетрії конічної частини лійки.

Під час проектування фасувальних пристроїв для функціональних модулів дозування стаканчикового типу безперервної дії поряд з ексцентриситетом циліндричної частини лійки доречно конусну частину виконувати у вигляді тора, що змінює площу поперечного перерізу від тора до кола діаметром циліндричної частини лійки (рис. 9).

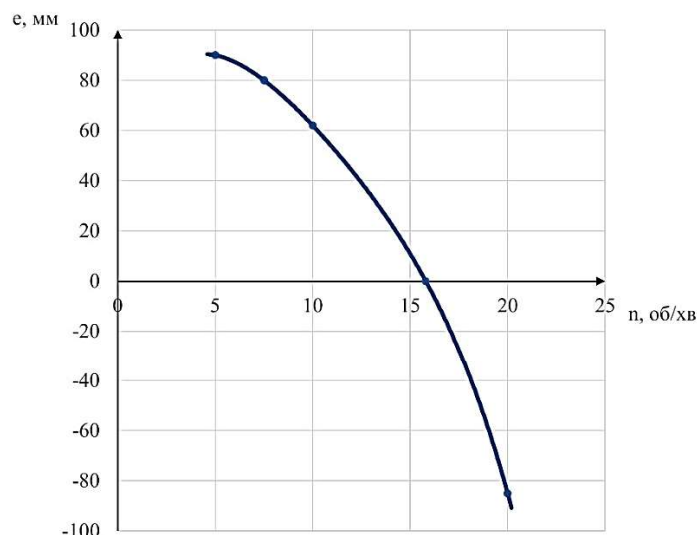


Рис. 8. Зміна значення ексцентриситету фасувального пристрою за різного значення частоти обертання ротора дозатора (розрахункові дані: $m_0=6$; $D_p=0,8$ м; $Z=30$ уп/хв; $n=5$ об/хв; $Z=45$ уп/хв; $n=7,5$ об/хв; $Z=60$ уп/хв; $n=10$ об/хв; $Z=90$ уп/хв; $n=15$ об/хв; $Z=120$ уп/хв; $n=20$ об/хв)

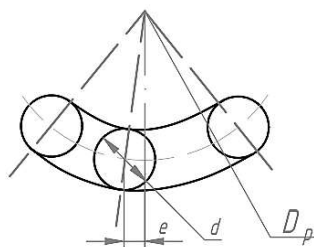


Рис. 9. Схема раціональної конструкції фасувального пристрою для функціонального пристрою дозування стаканчикового типу безперервної дії

Висновки. 1. Встановлено, що основною ключовою компонентою тривалості кінематичного циклу фасування є тривалість переміщення сипкої продукції в лійці фасувального пристрою. Конструктивне виконання лійки впливає на додаткові опори переміщенню продукції при контакті її з внутрішньою поверхнею лійки та можливих ударних процесів між частинками продукції й елементами поверхні лійки.

2. Одержані математичні вирази, за допомогою яких можна визначити раціональне значення діаметра конусної частини лійки при заданій продуктивності дозувального модуля, компоновання пакувальної машини-автомата та структурно-механічних властивостей сипкої продукції.

3. На основі моделювання руху матеріальної частинки в продуктопроводі фасу-

вального пристрою одержано вираз для визначення раціонального значення ексцентриситету фасувального пристрою та ефективної площі поперечного перерізу лійки в місці спряження конічної та циліндричної частин фасувального пристрою. Одержані результати та запропоновані інженерні рекомендації стосуються переважно легкоплинної сипкої харчової продукції, зокрема таких матеріалів, як борошно, сіль, цукор. Зважаючи на значну варіативність реологічних властивостей сипких продуктів, для матеріалів із підвищеною вологістю, злипанням або неоднорідною структурою результати слід адаптувати з урахуванням специфіки їхнього переміщення в продуктопроводах фасувального обладнання.

4. Аналіз результатів теоретичних досліджень надає можливість рекомендувати під час проектування фасувальних пристроїв для сипкої продукції приймати раціональні значення ексцентриситету зміщення осі симетрії циліндричної частини щодо осі симетрії конічної частини лійки, а також за мінімізації габаритів і ваги фасувального пристрою виконати його конічну частину у вигляді тороподібної форми.

ЛІТЕРАТУРА

1. Гавва, О. М. та ін. (2023). *Системна інженерія пакувальних машин-автоматів*: монографія. Київ: Вид-во «Сталь».
2. Stupnytskyu, V. V. (2013). Principles of functional-oriented technology manufacturing products engineering production. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні та приладобудуванні*, 760, 26—34.
3. *A Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK Guide)*. (2004). USA: PM1 Standards Committee.
4. Гавва, О. М. та ін. (2015). *Функціонально-модульне проектування пакувальних машин*: монографія. Київ: Вид-во «Сталь».
5. Масло, М. А., Гавва, О. М. (2014). Вплив динаміки робочих органів пакувальних машин на технологічні параметри процесів пакування. *Упаковка*, 6, 32—36.
6. Масло, М. А. (2003). Вдосконалення вагових дозаторів. *Упаковка*, 28, 29.
1. Кирия, Р. В., Брагінець, Д. Д., Мищенко, Т. Ф. (2012). Истечение сыпучего груза из бункера с регулируемой боковой заслонкой. *Геотехническая механика: Межвед. сб. науч. тр.* Днепропетровск: ИГТМ НАНУ, 101, 130—138.
7. Derenivska, A. et al. (2014). Optimization of transportation of bulk solids food products in the linear weight feeder of packing machine. *Journal of Food and Packaging Science, Technique and Technologies*, 3, 20—23.
8. Овчаренко, А. И., Середя, А. Д., Шапиро, М. В. (2007). Погрешность дозирования сыпучих продуктов. *Упаковка*, 1, 44—47.
9. Булгаков, В. М. та ін. (2016). Уточнена теорія руху матеріальної точки по гравітаційним поверхням сільськогосподарських машин. *Науковий вісник ТДАТУ*, 2(1), 1—14.
10. Sholoviy, Y. P., Maherus, N. I. (2014). The development of the mathematical model of the fine disperse material behavior under vibration in the conical hole of the dispenser. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні та приладобудуванні*, 786, 24—29.
11. Магерус, Н. І. (2014). Вплив параметрів вібрації та геометрії лунки на рух дрібнодисперсного сипкого матеріалу у конічній лунці дозатора. *Вібрації в техніці та технологіях*, 2, 71—77.
12. Пальчевський, Б. О., Бондарчук, Д. В. (2010). Аналіз точності роздільно-порційного об'ємного дозування сипких матеріалів. *Наукові нотатки*, 28, 398—402.
13. Пальчевський, Б. О., Бондарчук, Д. В. (2011). Експериментальне дослідження роботи об'ємних дозувальних пристроїв сипких речовин. *Технологічні комплекси*, 3, 57—62.
14. Бондарчук, Д. (2010). Підвищення точності роботи об'ємних дозаторів сипких речовин. *Технологічні комплекси*, 1, 99—103.
15. Zuriguel, I., Parisi, D. R., Hidalgo, R. C., Lozano, C., Janda, A., Gago, P. A., Peralta, J. P., Ferrer, L. M., Pignaloni, L. A., Clément, E. et al. (2014). Clogging transition of many-particle systems flowing through bottlenecks. *Sci. Rep.*, 4, 7324.

16. Chou, C. S., Tzeng, C. Y., Smid, J., Kuo, J. T., & Hsiau, S. S. (2000). *Experimental study of moving granular bed: Wall stress measurement*. In Proceedings of the 14th ASCE Engineering Mechanics Division Conference, Austin, TX, USA, 21—24 May.
17. Longhi, E., Easwar, N., & Menon, N. (2002). Large force fluctuations in a flowing granular medium. *Phys. Rev. Lett.*, 89, 045501. doi: 10.1103/PhysRevLett.89.045501.
18. Chen, J. F., Rotter, J. M., Ooi, J. Y., & Zhong, Z. (2006). Correlation between flow pattern and wall pressures in a full scale silo. *Eng. Struct.*, 29, 2308—2320. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2006.11.011>.
19. González-Montellano, C., Gallego, E., Ramírez-Gómez, Á., & Ayuga, F. (2012). Three dimensional discrete element models for simulating the filling and emptying of silos: Analysis of numerical results. *Comput. Chem. Eng.*, 40, 22—32.
20. Magalhães, F. G., Atman, A. P., Moreira, J. G., & Herrmann, H. J. (2016). Analysis of the velocity field of granular hopper flow. *Granul. Matter*, 18, 33.
21. Cleary, P. W., & Sawley, M. L. (2002). DEM modelling of industrial granular flows: 3D case studies and the effect of particle shape on hopper discharge. *Appl. Math. Model.*, 26, 89—111. [https://doi.org/10.1016/S0307-904X\(01\)00050-6](https://doi.org/10.1016/S0307-904X(01)00050-6).
22. Cleary, P. W. (2007). DEM modelling of particulate flow in a screw feeder model description. *Progress in Computational Fluid Dynamics, an International Journal* [online], 7(2—4), 128—138. Доступно з: <https://doi.org/10.1504/PCFD.2007.013005>.