

SUBSTANTIATION OF OPERATING MODES OF ADAPTRONIC FUNCTIONAL MODULES FOR DOSING LIQUID PRODUCTS BY WEIGHT

O. Gavva, L. Kryvoplias-Volodina

National University of Food Technologies

Key words:

*Adaptive functional module
Valve
Effective product flow area
Nozzle
Geometric shape
Product dose
Consumer packaging
Liquid products*

Article history:

Received 16.10.2023
Received in revised form 31.10.2023
Accepted 13.11.2023

Corresponding author:

L. Kryvoplias-Volodina
E-mail:
krivoplyas-volodina@ukr.net

Citation: Гавва О. О., Кривопляс-Володіна Л. О. (2023). Обґрунтування режимів роботи адаптронних функціональних модулів дозування рідкої продукції ваговим способом. *Наукові праці НУХТ*, 29(5), 66—76.
DOI: 10.24263/2225-2924-2023-29-5-7

ABSTRACT

Modern automatic machines must be characterized not only by high performance but also by high functional accuracy. For automatic packaging machines that pack products into consumer packaging, this functional accuracy is the accuracy of dose formation. At the current stage of designing packaging machines (availability of functional modules, microdrives, microsensors, computer control technologies, etc.), it is appropriate to create adaptive functional modules for the weight-based dosing method. This method of dosing for liquid products was almost never used due to the lack of appropriate drives, sensors of mechanized control systems, as well as justification of the operating modes of the product power supply system and the weighing system. The developed structure of an adaptronic functional module for dosing liquid products in a weighted manner is presented in the article. The stages of filling containers with liquid products were analyzed taking into account the dynamic component of weighing. The process of dose formation in terms of time and dosing accuracy can be optimized by rational selection of the geometric shape of the nozzle valve and the rational law of its movement relative to the nozzle channel. A theoretical analysis of the product movement through the nozzle channel using four commonly used geometric shapes of the valve (conical; spherical with a seat that does not follow the shape of the valve; spherical with a seat that follows the shape of the valve; cylindrical) is performed. On the example of packaging milk in a 1-litre bottle, graphical dependencies were obtained that reflect the efficiency of product flow control. It was found that conical valves provide the largest valve stroke with the same flow characteristics, and spherical valves with a seat that follows the shape of the valve provide the smallest stroke. The analysis of these results suggests that the most optimal geometric shape is conical-spherical or drop-shaped.

DOI: 10.24263/2225-2924-2023-29-5-7

ОБҐРУНТУВАННЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ АДАПТРОННИХ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ МОДУЛІВ ДОЗУВАННЯ РІДКОЇ ПРОДУКЦІЇ ВАГОВИМ СПОСОБОМ

О. О. Гавва, Л. О. Кривопляс-Володіна

Національний університет харчових технологій

Сучасні машини-автомати мають характеризуватися не тільки високою продуктивністю, але й високою точністю виконання функцій. Для пакувальних машин-автоматів, що пакують продукцію в споживчу тару, такою функціональною точністю є точність формування дози. На нинішньому етапі проектування пакувальних машин (наявність функціональних модулів, мікроприводів, мікродатчиків, комп'ютерних технологій керування тощо) доречним є створення адаптронних функціональних модулів для вагового способу формування дози. Донедавна цей спосіб дозування для рідкої продукції майже не застосовувався через відсутність відповідних приводів, датчиків механізованих систем керування, а також обґрунтування режимів роботи системи живлення продукції та системи зважування.

У статті наведено розроблену структуру адаптронного функціонального модуля дозування рідкої продукції ваговим способом. Проаналізовано етапи наповнення тари рідкою продукцією та врахування динамічної складової зважування. Оптимізувати процес формування дози за часом і точністю дозування можна шляхом раціонального підбору геометричної форми клапана насадки та раціонального закону його руху відносно каналу насадки. Виконано теоретичний аналіз руху продукції по каналу насадки при застосуванні чотирьох широко використовуваних геометричних форм клапана (конічної; сферичної із сідлом, що не повторює форму клапана; сферичної із сідлом, що повторює форму клапана; циліндричної). На прикладі фасування молока в пляшку місткістю 1 л одержано графічні залежності, що відображають ефективність регулювання потоком продукції. Встановлено, що клапани конічної форми забезпечують найбільший хід клапана при однакових витратних характеристиках, а сферичної із сідлом, що повторює форму клапана, найменший хід. Аналіз цих результатів надає можливість припустити, що найбільш оптимальною геометричною формою є конічно-сферична, або подібна до краплі.

Ключові слова: адаптронний функціональний модуль, клапан, ефективна площа потоку продукції, насадка, геометрична форма, доза продукції, споживча тара, рідка продукція.

Постановка проблеми. Пакувальні машини-автомати можна характеризувати значною кількістю показників технічної досконалості, якими й визначають її конкурентоспроможність. Одним із таких важливих показників для машин пакування продукції у споживчу тару є точність формування дози. Відповідно до міжнародних стандартів поле допуску на точність дозування знаходиться в плюсовому полі. Забезпечити такі вимоги можна шляхом збільшення втрати продукції

виробником або розробкою та впровадженням новітніх технічних систем, побудованих на елементах адаптроніки, мехатроніки, мікроприводів, мікродатчиків тощо. Зазвичай, такі системи побудовані на ваговому способі формування дози з тензометричною схемою вимірювання ваги та комп'ютерних технологіях керування етапами дозування. Створення пакувальних машин на основі адаптронних функціональних модулів є одним із пріоритетів автоматизації виробництва, передбачених промисловою революцією «Індустрія 4.0». Впровадження адаптронних функціональних модулів дозування рідкої продукції ваговим способом передбачає встановлення функціональних залежностей між витратами продукції через насадку та конструктивними й кінематичними параметрами клапана, що змінює величину потоку продукції. А тому поставлені завдання дослідження є актуальними й потребують ефективної реалізації.

Огляд останніх досліджень і публікацій. Рідку продукцію, яка за структурно-механічними властивостями наближена до ідеальної ньютонівської рідини, здебільшого дозують об'ємним способом. Для реалізації об'ємного способу використовують функціональні модулі, які забезпечують формування дози в мірних місткостях, за рівнем споживчій тарі, жорсткою конструкцією тари (метод витискання) та використанням витратних пристроїв. З наведених методів формування дози продукції об'ємним способом застосування мірних ємностей забезпечує найвищу точність (Isermann, 2023). Поряд із цим дозувально-фасувальні модулі із мірною ємністю є складні за конструкцією та системою автоматичного регулювання величини дози. Їх також можна характеризувати як малопродуктивні. Усунути ці проблеми можна, застосувавши ваговий спосіб формування дози, попри відносно складну систему керування. Структура такого функціонального модуля включає пристрій живлення, зважувальну систему, блок контролю потоку продукції живильником і блок контролю сили, що діє на зважувальну систему (здебільшого тензометричну). Формування дози продукції ваговим способом досліджено під час пакування легкоплинної сипкої продукції у споживчу тару (Badiru, & Omitaoti, 2023). Об'єкт дозування, сипка продукція, прийнята як ньютонівська рідина, що характеризується законом безперервного руху потоку. Результатами досліджень встановлено, що на динамічну складову ваги продукції, що сприймається зважувальною системою, суттєво впливає режим потоку живлення та розташування зважувальної ємності (Rangappa, 2020). Під час пакування рідини зважувальною ємністю є споживча тара. Для оптимізації операції дозування і фасування по її тривалості й точності формування дози важливо забезпечити відповідний закон зміни потоку продукції живильником у тару. Вирішити це завдання можна різними способами: клапанною системою, пневматичною, запірною арматурою (Bauer, 2019). В існуючих конструкціях пакувальних машин широко використовують клапанну систему з індивідуальним приводом на клапані та мікропроцесорною системою керування переміщення клапана відносно сідла насадки (Brody, 2000). Інтенсивність переміщення рідкої продукції в каналах живильника також залежить від геометричної форми клапана і сідла насадки.

У функціональних модулях з безклапанною системою живлення реалізувати потрібно режими потоку продукції досить (Sukhareva, & Yakovlev, 2018). Кожний вид рідких продуктів має певні властивості, що відповідним чином впливає на

геометрію живильника і систему управління тиском (Nelson, 2007). Моделюванню цих процесів приділяється значна увага (Ron, 2006). На сьогодні достатньо широко використовують електричні методики (Vazquez-Santacruz, 2023), однак вони не можуть забезпечити повноту розрахунку живильника, включаючи зміну характеристик двокомпонентного потоку за різних режимів роботи (de Moraes, 2017; Jacobs, 2003). Теоретичний опис процесу пневмотранспортування у (Zhang, & Liu, 2012) з використанням складної системи диференціальних рівнянь лише ускладнює пошук шляхів розв'язання проблеми. У праці (Sukhareva, & Yakovlev, 2018) розглядаються відомі порційні дозувальні функціональні модулі. Методом контролю вихідного параметра запропоновано значення величини дози в процесі її відмірювання з подальшим контролем моменту формування дози, але без подальшого контролю величини дози продукту. У пропозиції (Vazquez-Santacruz, 2023) розглядаються порційні дозувальні модулі, які використовують метод контролю вихідного параметра для визначення величини дози в процесі її відмірювання. Однак ці модулі не забезпечують подальшого контролю величини дози продукції. Окремі дослідження, наприклад (Shurong Ning, 2021), присвячені розв'язанню завдань багатокомпонентного дозування. Авторами запропоновано та реалізовано нові схеми автономного безперервного дозування, змішування та пакування різнокомпонентних продуктів у заданому співвідношенні. У (Tomoki Takase, 2022) також розглядаються завдання багатокомпонентного дозування. Для вирішення таких завдань потрібно розглядати метод одночасного порційного дозування складових багатокомпонентних продуктів із заданим вмістом компонентів. Матеріали наведених досліджень (Ashutosh Singh, 2023) обґрунтовують результати, що пов'язані з системами об'ємного дозування, які застосовуються в пакувальних машинах зі стабільними параметрами продуктів, зокрема об'ємна маса та в'язкість. Автори праць (Vavřík, & Fusko, 2022; Radovan Furmann, 2017) зазначають, що системи дозування з ваговою апаратурою є більш точні та надійні. Точність дозування розглядається в праці (Gavva, & Kryvoplias-Volodina, 2021), де витрати продукції регулюються пневмоклапанами. В таких системах спостерігається нестабільність характеристики пневмоклапанів під час роботи з малими перепадами тисків. Наведені результати не мають кінцевих рекомендацій для конструкції дозатора. Проведений аналіз виконаних досліджень, пов'язаних з ефективністю роботи адаптронних функціональних модулів дозування рідкої продукції, підтвердив недостатність досліджень щодо їх конструкцій, експлуатаційних характеристик та систем керування.

Метою статті є дослідження розроблення структурної схеми адаптронного функціонального модуля дозування рідкої продукції ваговим способом та обґрунтування режимів роботи клапанної системи за різних її конструктивних виконань.

Матеріали і методи. Об'єктом дослідження є адаптронний функціональний модуль дозування рідкої продукції ваговим способом. Якість функціонування цього модуля значною мірою залежить від роботи пристрою подачі продукції в споживчу тару. В існуючих конструкціях модулів дозування рідкої продукції зміну пропускної здатності насадки забезпечують клапани. Геометрична форма та закон руху клапана відносно каналу насадки суттєво впливають на характер зміни пропускної здатності насадки. Пропускна здатність насадки — це один із важливих параметрів, що забезпечують задану продуктивність функціонального модуля

та зменшення динамічної складової похибки дозування. Для визначення раціональної геометричної форми клапана та, відповідно, сідла використано методи математичного модулювання, що базуються на основі неперервності потоку продукції та законів переміщення рідини по каналах різної геометричної конфігурації.

Результати і обговорення. На рис. 1 наведено вдосконалену структурну схему адаптронного функціонального модуля дозування рідкої продукції ваговим способом. За схемою продукція надходить через елемент подачі 1, що з'єднаний з клапаном 2, який забезпечує потрібну пропускну здатність живильника. Здебільшого зміна пропускну здатності живильника відбувається шляхом вертикального переміщення клапана. Під насадкою із клапаном розташована споживча тара (пляшка) 3. Тара 3 встановлюється на елемент зважування 4. Клапан 2 з'єднаний з індивідуальним приводом.

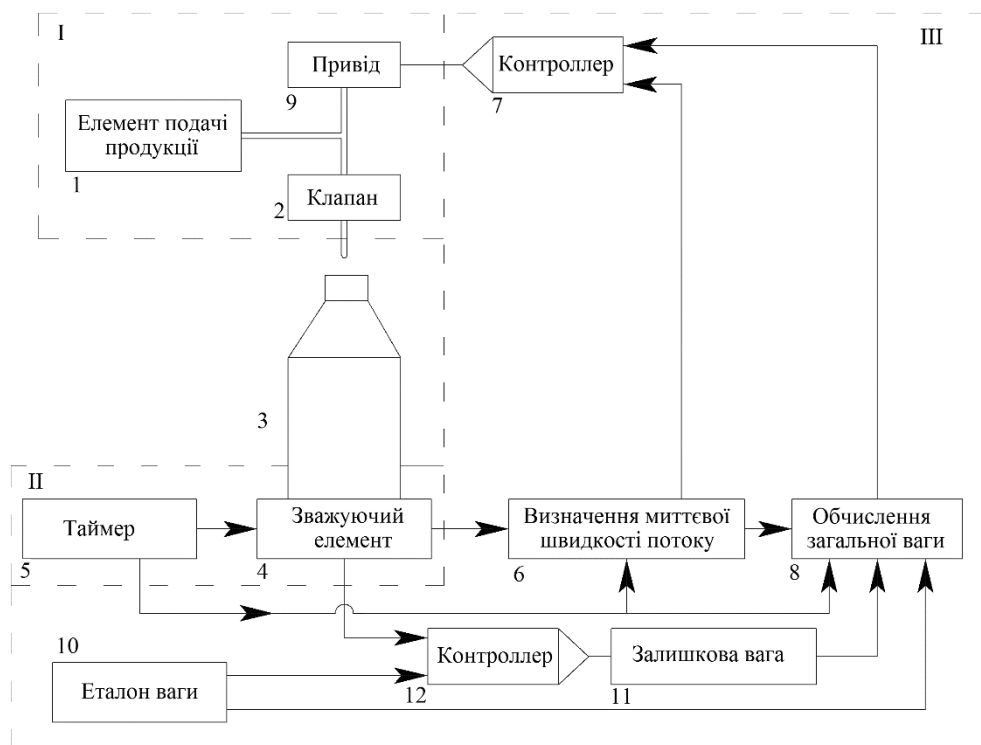


Рис. 1. Структурна схема адаптронного функціонального модуля дозування рідкої продукції ваговим способом

Вид і геометричні параметри клапана надають можливість, залежно від динамічної в'язкості продукту, змінювати ефективну площу перерізу каналу живлення. Поточне положення клапана живильника залежить від стадії формування дози («грубе дозування», «точне дозування»), об'ємної маси продукції її в'язкості та надлишкового тиску продукції в каналі подачі. Модуль включає також таймер 5 для забезпечення загальної тимчасової бази відліку для різних елементів, що реалізують процес дозування і фасування.

Для повного контролю процесом дозування елемент зважування 4 з'єднаний з пристроєм 6 для вимірювання миттєвої швидкості потоку в живильнику, причому цей пристрій з'єднаний з елементом управління 7 і з елементом обчислення загальної ваги продукції 8. Так, для вимірювання значень миттєвих витрат сигнал від елемента зважування 4 відбирається з регулярним інтервалом часу (одна тисячна частка секунди). Отримане миттєве значення швидкості потоку спочатку передається до елемента управління 7, який керує положенням клапана 2, а потім до елемента обчислення загальної ваги 8 (продукція в тарі).

Елемент управління 7 клапана 2 також сприймає значення швидкості потоку 9, з яким порівнюються виміряні миттєві витрати для коригування положення клапана 2.

Крім цього, елемент обчислення загальної ваги продукції 8 приймає сигнал від елемента ваги 10 і сигнал визначення ваги доданої продукції 11. Елемент обчислення загальної ваги 8 порівнює обчислену загальну вагу нетто продукції з показами сигналів 10 та 11 і формує сигнал елемента 7, щоб зменшити або зупинити потік, коли ці два значення будуть рівними.

Елемент зважування 8 подає сигнал елементу 12 для обчислення середньої швидкості витрат потоку, після чого результуючий сигнал передається на компаратор 13, який також сприймає відносну середню швидкість витрат потоку 14.

Реальна вага продукції (нетто) обчислюється шляхом віднімання ваги тари від загальної ваги. Сигнал, що відповідає чистій вазі продукції, надходить до компаратора 15, який порівнює реальну вагу продукції з еталонним значенням 10. Процес зважування включає як статичну, так і динамічну складові руху продукції. Для маніпуляції впливу динамічної складової на точність дозування потрібно виконати ряд теоретичних досліджень щодо раціональної конструкції клапана і насадки та зміни ефективної площі каналу живильника. Більшість клапанних дозувально-фасувальних пристроїв мають подібну конструкцію, основними складовими яких є: корпус 1, клапан 2 та насадки 3 (рис. 2).

Аналіз впливу геометрії клапана на пропускну здатність насадки доречно виконати за таких конструкцій клапанів: конічні; сферичні (сідло не повторює форму клапана); сферичні (сідло повторює форму клапана); циліндричні. Під час вагового способу формування дози пропускну здатність насадки має змінюватися від максимального значення до нуля за відповідним законом, який визначається залежно від геометрії споживчої тари, дози продукції, тривалості дозування та реологічних характеристик продукції. В адаптронних функціональних модулях формування частин дози «грубої» та «чистої» виконується за безперервним режимом при мінімальній тривалості циклу та максимальній точності дозування. Для реалізації цієї умови клапанною системою маємо виконати умову:

$$Q_{\text{кл}} = Q_{\text{розр}} \text{ або } S_{\text{еф.кл}} = S_{\text{еф.розр}}. \quad (1)$$

де $Q_{\text{кл}}$, $Q_{\text{еф.розр}}$ — пропускну здатність насадки з клапаном та розрахована за вихідними даними відповідними; $S_{\text{кл}}$, $S_{\text{еф.розр}}$ — ефективна площа каналу насадки з клапаном та розрахована за вихідними даними операції дозування відповідно.

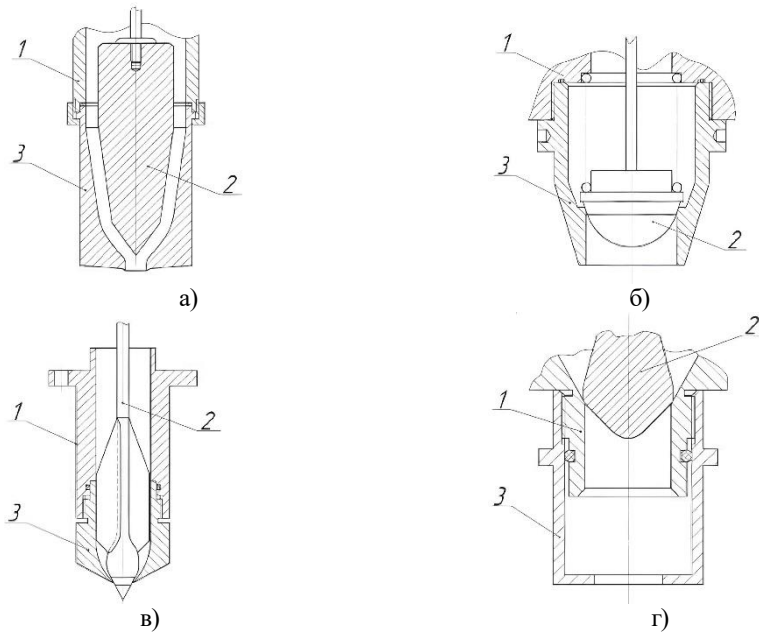


Рис.2. Типові конструкції клапанних дозувально-фасувальних пристроїв для рідкої продукції: а) конічна; б) сферична; в) комбінована; г) краплеподібна: 1 — корпус; 2 — клапан; 3 — насадка

У клапанних дозувально-фасувальних пристроях зміна ефективної площі насадки здійснюється шляхом відносного переміщення клапана. Переміщення клапана виконується за допомогою встановленого індивідуального пневмо- або електромагнітного приводів. Для керування рухом ведених ланок приводів потрібно знати зміну положення клапана в часі. Виконано аналіз ефективності регулювання пропускної здатності насадки за наявності чотирьох форм клапанів.

А. Конічна форма клапана. Розрахункову схему дозувально-фасувального пристрою із конічним клапаном наведено на рис. 3.

Відповідно наведеній розрахунковій схемі ефективну площу поперечного перерізу каналу насадки можна визначити за формулою:

$$S_{\text{эф}} = \pi \cdot h \cdot \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) (2 \cdot r_1 - 0,5 \cdot h \cdot \sin \alpha), \quad (2)$$

де h — переміщення клапана відносно каналу насадки; α — кут при вершині конуса клапана; r_1 — радіус вхідного каналу насадки.

Для максимального забезпечення пропускної здатності насадки потрібно, щоб ефективна площа насадки πr_1 дорівнювала ефективній площі каналу продукції із клапаном.

Б. Сферична форма клапана (сідло не повторює форму клапана). Відповідно прийнятим позначенням (рис. 4) визначимо висоту конуса h , по поверхні якого визначається ефективна площа поперечного перерізу насадки із клапаном:

$$h = \left(r_1^2 - \frac{r_2^2}{4} \right)^{0,5}, \quad (3)$$

де r_1 — радіус сфери клапана; r_2 — радіус каналу насадки.

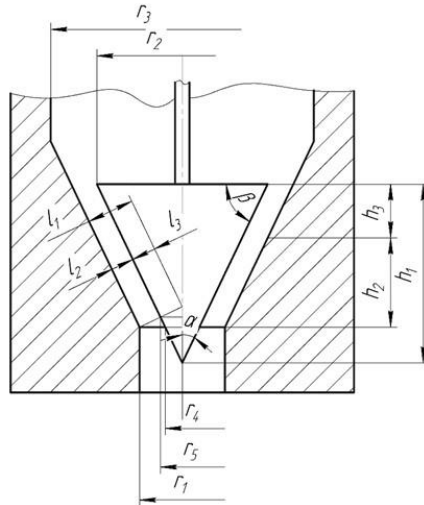


Рис. 3. Розрахункова схема дозувально-фасувального пристрою із конічним клапаном

Ефективну площу поперечного перерізу насадки із сферичним клапаном визначимо за формулою:

$$S_{\text{эф}} = \pi \cdot l_2 (r_2 + r_3), \quad (4)$$

де r_3 — радіус конуса, яким сфера перекриває вихідний канал, визначається

$$r_3 = \frac{1}{h} (h - h_3) \cdot r_2; \quad l_2 \text{ — довжина бічної поверхні відкритої частини конуса,}$$

$$l_2 = r_1 - l_1;$$

$$l_1 = r_1 (h - h_3). \quad (5)$$

В. Сферична форма клапана (сідло повторює форму клапана). Розрахункова схема дозувально-фасувального пристрою наведена на рис. 5.

Площу ефективного поперечного перерізу каналу насадки із сферичним клапаном можна визначити за формулою:

$$S_{\text{эф}} = \pi \cdot l_4 (r_1 + r_4), \quad (6)$$

де r_4 — радіус площі каналу насадки, що перекрита клапаном, $r_4 = r_1 \cdot \sin \beta$;

$$\beta = \frac{\pi}{2} - \alpha; \quad \alpha = \arcsin \left(\frac{h_3}{r_1} \right) \quad (7)$$

$$l_4 \text{ — зазор між клапаном та сідлом, } l_4 = l_3 - r_1, \quad l_3 = \frac{r_3}{\sin \beta}.$$

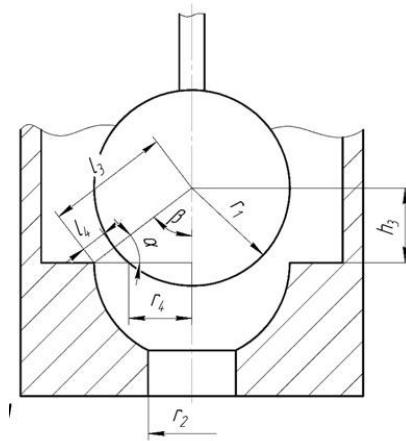


Рис. 4. Розрахункова схема дозувально-фасувального пристрою із сферичним клапаном і сідлом, що не повторює форму клапана

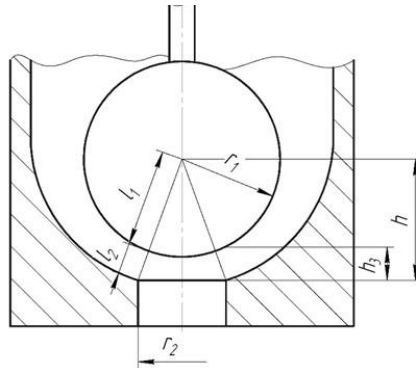


Рис. 5. Розрахункова схема дозувально-фасувального пристрою із сферичним клапаном і сідлом, що повторює форму клапана

Г. Циліндрична форма клапана. Площа ефективного поперечного перерізу каналу насадки із клапаном циліндричної форми (рис. 6) визначається за формулою:

$$S_{ef} = \pi \cdot r_1 \cdot h_3. \quad (8)$$

Повне відкриття каналу насадки буде при $h_3 = r_1$.

Відповідно до одержаних залежностей можна відмітити, що, незважаючи на відносно просту геометрію клапанів, зміна їх геометрії суттєво впливає на реалізацію процесу дозування. Встановлено також, що клапани конічної форми забезпечують найбільший хід клапану при однакових витратних характеристиках.

Виконавши числові розрахунки переміщення клапанів і дозувально-фасувальному пристрої при дозуванні молока в пляшку місткістю 1 л одержали такі залежності (рис. 7).

Виконавши числові розрахунки переміщення клапанів і дозувально-фасувальному пристрої при дозуванні молока в пляшку місткістю 1 л одержали такі залежності (рис. 7).

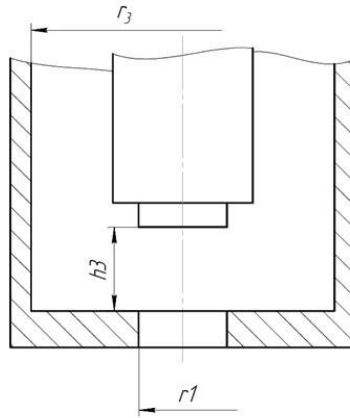


Рис. 6. Розрахункова схема дозувально-фасувального пристрою із каналом циліндричної форми

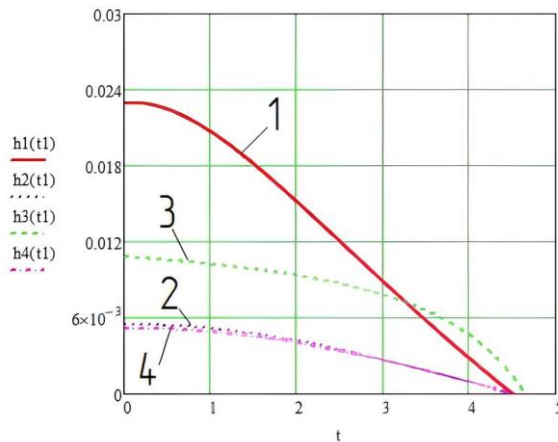


Рис. 7. Зміна положення клапанів під час дозування молока в пляшку місткістю 1 л ваговим способом

Клапан зі сферичною поверхнею та сідлом, що повторює форму клапана, має відносно короткий хід та може забезпечувати точне регулювання площі ефективного потоку на завершальному етапі формування дози. Клапани циліндричної та сферичної форм, що не повторюють форму клапана мають, в наближенні, однакову величину зміни площі ефективного перерізу каналу насадки.

Висновки

Розроблена структурна схема адаптронного функціонального модуля надає можливість реалізувати процес дозування рідкої продукції ваговим способом. Ваговий спосіб дозування зі зворотним зв'язком за контрольними параметрами

миттєвих витрат забезпечує як задану продуктивність, так і високу точність дозування.

Проведено теоретичний аналіз ефективної площі каналу насадки від форми клапана та його відносного переміщення. Це дає змогу за заданої тари, продукції, циклу роботи забезпечити рух клапана за відповідним законом.

Числовими розрахунками встановлено, що клапани конічної форми забезпечують найбільший хід клапана при однакових витратних характеристиках, а сферичної та сідлом, що повторює форму клапана, — найменший хід.

Отже, можна припустити, що оптимальна геометрія клапана — конічно-сферична, або подібна до краплі.

Література

Ashutosh, Singh. (2023) Machine Configuration Based on Machine Reliability and Production Rate Criteria Through Line Balancing Algorithm in Reconfigurable Manufacturing System (RMS). *Industrial Engineering Research Group*. 1120—1145. doi: https://doi.org/10.1007/978-981-99-1308-4_14.

Badiru, A. B., Omitaomu, O. A. (2023). *Systems 4.0: Systems Foundations for Industry 4.0* (1st ed.). CRC Press. doi: <https://doi.org/10.1201/9781003312277>.

Bauer, E. (2019). *Pharmaceutical Packaging Handbook* (2st ed.). CRC Press. doi: <https://doi.org/10.3109/9781420012736>.

Brody, A. (2000). *Flexible Packaging Of Foods* (3st ed.). CRC Press. doi: <https://doi.org/10.1201/9781315151007>.

Gavva, O., Kryvoplias-Volodina, L., Blazhenko, S., Tokarchuk, S., Derenivska, A. (2021) Synthesis of a precision dosing system for liquid products based on electro-pneumatic complexes. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies* [this link is disabled](#), 6(2—114), 125—135. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.247187>.

Isermann, Rolf (2023). *Designs and Specification of Mechatronic Systems*. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-96729-1_13.

Radovan, Furmann (2017). Interactive Design of Reconfigurable Logistics Systems — Process Intensification. *Procedia Engineering*, 192, 207-212. doi: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.06.036>.

Rangappa, S. M., Parameswaranpillai, J., Thiagamani, S. M. K., Krishnasamy, S., Siengchin, S. (Eds.). (2020). *Food Packaging: Advanced Materials, Technologies, and Innovations*.

Shurong, Ning (2021) Research on micro-liquid dispensing driven by a syringe pump with the consideration of air volume. *Microsystem Technologies*, 27(8), 1—14. doi: <https://doi.org/10.1007/s00542-020-05133-9>.

Sukhareva, N., Yakovlev, F., (2018). *Polymers for Packaging and Containers in Food Industry*. doi: <https://doi.org/10.1201/b12240>.

Tomoki, Takase (2022) Evaluating the safety and efficiency of robotic dispensing systems. *Journal of Pharmaceutical Health Care and Sciences*, 8(1). doi: <https://doi.org/10.1186/s40780-022-00255-w>.

Vavrik, V., Fusko, M. (2022) Designing of Machine Backups in Reconfigurable Manufacturing Systems. *Appl. Sci.*, 12, 2338. doi: <https://doi.org/10.3390/app12052338>.

Vazquez-Santacruz, J. A. (2023) *Towards an integrated design methodology for mechatronic systems Research in Engineering Design*. Springer-Verlag London Ltd., doi: <https://doi.org/10.1007/s00163-023-00416-4>.