

УДК 621.87

## DEVELOPMENT OF THE MECHATRON MODULE FOR DOSING LIQUID FOOD PRODUCTS

**O. Horchakova, M. Iakymchuk**

*National University of Food Technologies*

---

**Key words:**

*Mechatronic module*

*Dosage*

*Valve*

*Law of motion*

*Liquid food product*

---

**Article history:**

Received 08.10.2019

Received in revised form

18.10.2019

Accepted 11.11.2019

---

**Corresponding author:**

O. Horchakova

**E-mail:**

horchakovaom@gmail.com

---

**ABSTRACT**

---

The article is devoted to the research and development of the mechatronic module for dispensing liquid food products. To perform research, an analysis of the designs of the working bodies of the dispensing devices, it was determined that the the working bodies with a conical valve are mostly used.

It was established to ensure the accuracy of dispensation the necessity to set the law of motion of valve movement. When conducting research, the law of valve movement is proposed, which consists of three stages, namely the quick opening of the metering channel, height and smooth closing. To increase the accuracy of dispensation, attention was focused on the stage of closing the dosing channel. In addition, the kinematic and dynamic characteristics of the fluid flow significantly affect the accuracy of the implementation of the given law of motion of the valve. A mathematical model of the pressure changes in the metering channels of the device was developed in case of closing the metering valve according to the parabolic law of motion, and the valve speed was determined when performing the third stage, namely, smooth closing of the valve.

Based on the results of the analysis of the designs of the dispensers, a scheme of a mechatronic module for dispensing liquid food products was proposed. This scheme allows, by simultaneously analyzing the movement of the dispenser valve and the weight of the liquid food product, to ensure dispensing accuracy.

Based on the studies and the developed scheme of the functional mechatronic module for dispensing liquid food products with a conical valve, an experimental setup was designed and manufactured. Based on the results of experimental studies, the mass flow rate response of the liquid food product  $Q$  was determined as a function of the change in the area of the dispensing channel that is created between the valve and the seat ( $f$ ) and air pressure ( $P$ ) into the pneumatic cylinder with a flexible body.

The results of the study will allow to determine the correction factors for the implementation of the given law of valve movement, to ensure high metering accuracy and increase the speed of the dispenser.

---

**DOI:** 10.24263/2225-2924-2019-25-6-10

---

## РОЗРОБКА МЕХАТРОННОГО МОДУЛЯ ДОЗУВАННЯ РІДКИХ ХАРЧОВИХ ПРОДУКТІВ

О. М. Горчакова, М. В. Якимчук

Національний університет харчових технологій

*Стаття присвячена дослідженню та розробці мехатронного модуля дозування рідкої харчової продукції. Для виконання досліджень проведено аналіз конструкції робочих органів дозуючих пристроїв і визначено, що найбільш часто використовуються робочі органи з конічним клапаном.*

*Встановлено, що для забезпечення точності дозування необхідно застосувати закон руху переміщення клапана. Запропоновано закон руху клапана, який передбачає три етапи: швидке відкривання каналу дозування, вистій і плавне закривання. Для підвищення точності дозування зосереджено увагу на етапі закривання каналу дозування. Окрім того, на точність реалізації заданого закону руху клапана суттєво впливають кінематичні та динамічні характеристики потоку рідини. Розроблено математичну модель зміни тиску в каналах дозувального пристрою для випадку закриття клапана дозатора за параболічним законом руху та визначено швидкість клапана під час виконання третього етапу — плавного закривання клапана.*

*За результатами проведеного аналізу конструкцій дозаторів запропоновано схему мехатронного модуля для дозування рідких харчових продуктів, що завдяки одночасному аналізу переміщення клапана дозатора та ваги рідкого харчового продукту забезпечує точність дозування.*

*На основі проведених досліджень та розробленої схеми функціонального мехатронного модуля дозування рідкої харчової продукції з конічним клапаном спроектовано та виготовлено експериментальну установку. За результатами експериментальних досліджень визначено відгук масових витрат рідкого харчового продукту  $Q$  як функцію зміни площі каналу дозування, що створюється між клапаном і сідлом ( $f$ ) та тиску повітря ( $P$ ) в пневмоциліндрі з гнучким корпусом.*

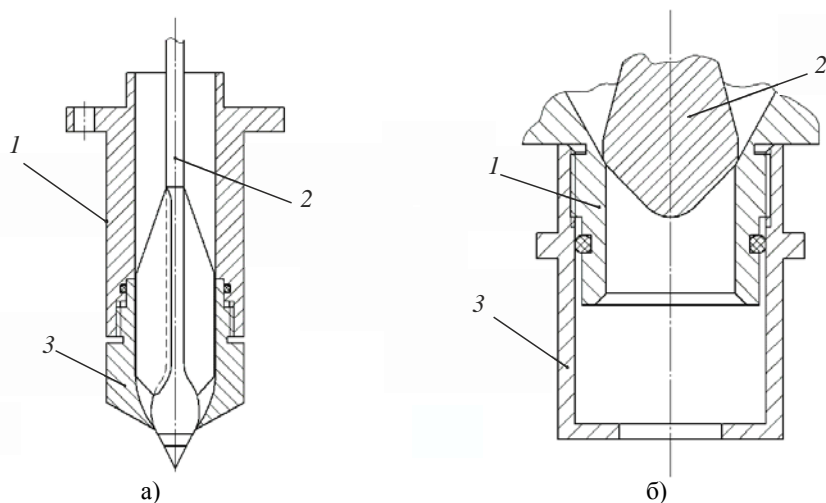
*Отримані результати дослідження дадуть змогу в подальшому визначити коефіцієнти коригування для реалізації заданого закону руху клапана, забезпечити високу точність дозування та збільшити швидкодію дозатора.*

**Ключові слова:** мехатронний модуль, дозування, клапан, закон руху, рідкий харчовий продукт.

**Постановка проблеми.** Сьогодні в Україні існує нагальна потреба у виготовленні нового покоління обладнання для пакування рідкої харчової продукції. Основними модулями таких ліній є дозатори. Серед конструкцій найбільш вживаними є прецензійні дозуючі пристрої, призначені для відмірювання і видачі заданої кількості продукту у вигляді порцій. Основними перевагами таких пристроїв є забезпечення підвищених вимог до точності

дозування, надійності, швидкодії експлуатації, а також можливості швидкого переналагодження.

Традиційно дозуючі пристрої для рідких харчових продуктів складаються з трьох основних елементів: сідла, клапана та корпусу [1]. Найбільш відповідальною ланкою дозатора є робочий орган — запірний клапан, що знаходиться в безпосередньому контакті з дозуючою рідиною та сідлом (рис. 1).



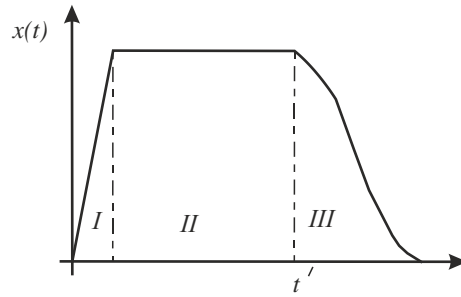
**Рис. 1. Конструкція робочого органу у вагових дозаторах:**  
а) конічний; б) циліндричний: 1 — сідло; 2 — клапан; 3 — корпус

Моделювання процесу взаємодії конусного клапана і сідла є складним завданням, вирішення якого залежить від прийнятих припущень, пов'язаних із конструктивними особливостями форми клапана, його матеріалом (полімер, метал) і фізико-механічними характеристиками рідкого харчового продукту тощо. Однак на практиці точність прецизійного дозування рідких харчових продуктів з тривалістю експлуатації дозатора суттєво зменшується. Насамперед це пов'язано із зміною розміру зазору між клапаном і сідлом, що характеризується зношенням матеріалів у місцях їх контакту, тому такі дозуючі системи потребують постійного регулювання [2].

**Метою дослідження** є розробка мехатронних дозаторів для рідких харчових продуктів, що базуються на постійному контролі та керуванні рухом клапанів із функціональними блоками підвищення точності і швидкодії систем дозування.

**Викладення основних результатів дослідження.** На основі проведеного аналізу конструкцій дозаторів і технологічних процесів дозування [3] можна стверджувати, що заданий закон руху клапана традиційно передбачає три етапи (рис. 2): I етап — швидке відкриття каналу дозування; II етап — вистій у відкритому положенні; III етап — закривання каналу дозування [4].

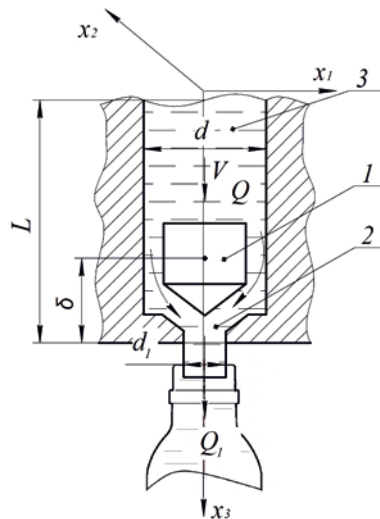
Запропоновано для плавності переміщення клапана на кінцевому етапі дозування реалізувати параболічний закон руху клапана дозатора.



**Рис. 2. Заданий закон руху клапана дозатора з прецизійним способом керування:**  
 I — відкриття каналу дозування; II — вистій клапана у відкритому положенні;  
 III — закривання каналу дозування

Передбачається, що приводом переміщення клапана, який забезпечує його робочий хід  $\delta$  у таких конструкціях дозаторів, є пневматичний або електромагнітний.

Встановлено, що на точність реалізації заданого закону руху клапана суттєво впливають кінематичні та динамічні характеристики потоку рідини. Схему потоків рідини в дозаторі в момент закриття клапана за параболічним законом руху показано на рис. 3.



**Рис. 3. Схема потоків рідкого харчового продукту в дозаторі в момент закриття клапана:** 1 — клапан дозатора; 2 — спрощена модель каналу системи подачі рідкого харчового продукту; 3 — рідкий харчовий продукт;  $Q$  — об'єм дозатора;  $Q_1$  — об'єм рідкого харчового продукту, що дозується в упаковку;  $V$  — швидкість руху рідини;  $d$  — внутрішній діаметр дозатора;  $d_1$  — діаметр вихідного отвору;  $L$  — висота дозатора з патрубками;  $\delta$  — переміщення клапана дозатора

Для розробки математичної моделі переміщення клапана були прийняті такі припущення: рідкий харчовий продукт розглядається як нестислива в'яз-

ка рідина [5]; густина рідкого харчового продукту залишається незмінною при зміні тиску, тобто  $\rho = const$ .

Диференціальне рівняння руху рідини між каналом і конусом дозатора, відповідно до вибраної системи координат, описується рівнянням:

$$\frac{dV}{dt} = -\frac{dp}{dx} \frac{1}{\rho} + 2nV, \quad (1)$$

де  $\rho$  — густина рідкого харчового продукту;  $2nV$  — сила в'язкого опору, де  $n = 2\nu/\Delta^2$ , де  $\Delta$  — висота пограничного шару рідкого харчового продукту;  $\nu$  — кінематичний коефіцієнт в'язкості.

Рух клапана на етапі закривання відбувається за параболічним законом:

$$x = at^2/2 + bt + c. \quad (2)$$

Відповідно, швидкість клапана на цьому етапі становить:

$$V = \frac{dx}{dt} = at + b. \quad (3)$$

Зміна тиску в циліндричному каналі між клапаном і корпусом дозатора описується рівнянням:

$$\frac{dp}{dx} = 2nV\rho - \frac{dV}{dt}\rho = 2n\rho at + 2n\rho b - \frac{dV}{dt}\rho. \quad (4)$$

Початковими умовами на другому етапі руху є час  $t=0$ , координата та швидкість клапана:  $x = 0$ ;  $V = V_0$ ;  $p = p_0$ . Кінцевими умовами етапу закриття є  $t = t_1$ ,  $x = L$ ,  $V = 0$ .

Підставимо початкові умови  $b = V_0$ ,  $a = -b/t_1 = -V_0/t_1$  в рівняння (3) та отримаємо зміну швидкості:

$$V = -\frac{V_0 t}{t_1} + V_0 = V_0 \left(1 - \frac{t}{t_1}\right). \quad (5)$$

Підставимо вираз (5) у рівняння (4) та отримаємо зміну тиску:

$$\frac{dp}{dx} = 2n\rho V_0 \left(1 - \frac{t}{t_1}\right) + \rho \frac{V_0}{t_1}. \quad (6)$$

Проінтегруємо рівняння (6) та визначимо тиск:

$$p = \int \left[ \rho \frac{V_0}{t_1} + 2n\rho V_0 \left(1 - \frac{t}{t_1}\right) \right] dx, \quad (7)$$

з урахуванням форми каналу:

$$p = \rho \frac{V_0}{t_1} x + 2n\rho V_0 \left(1 - \frac{t}{t_1}\right) x + C. \quad (8)$$

У рівнянні (8) визначимо постійну інтегрування  $C$ , підставимо початкові умови та отримаємо:

$$C = p_0. \quad (9)$$

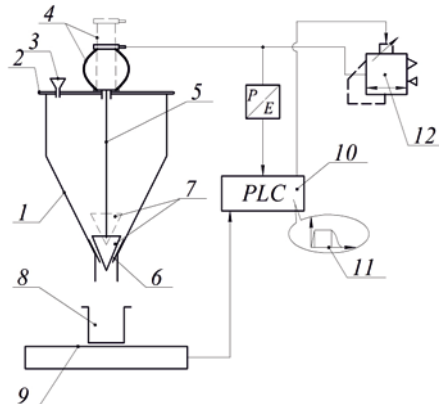
Підставимо рівняння (9) в рівняння (8) та отримаємо зміну тиску:

$$p = \rho \frac{V_0}{t_1} x + 2n\rho V_0 \left(1 - \frac{t}{t_1}\right) x + p_0. \quad (10)$$

Визначимо величину тиску в момент закриття клапана, що відповідає кінцевим умовам:  $x = L$  та  $t = t_1$ :

$$\Delta p = p - p_0 = \rho \frac{V_0}{t_1} L. \quad (11)$$

На основі проведеного аналізу конструкцій дозаторів запропонована принципово нова схема мехатронного модуля для дозування рідких харчових продуктів (рис. 4).

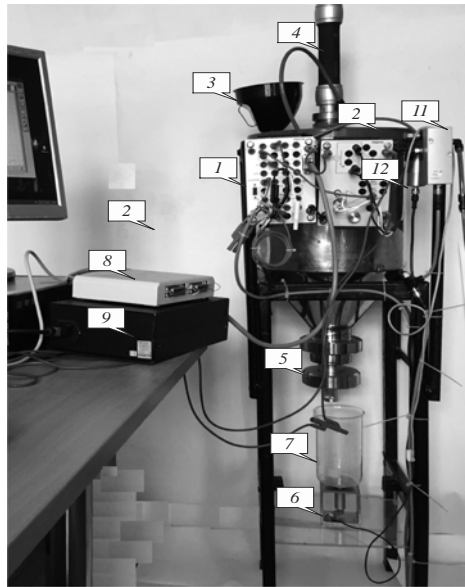


**Рис. 4. Схема функціонального мехатронного модуля дозування рідкої харчової продукції з конічним клапаном:** 1 — бункер; 2 — кришка; 3 — лійка; 4 — пневмоциліндр з гнучким корпусом; 5 — шток; 6 — сидло під клапан конічної форми; 7 — конусний клапан; 8 — споживча упаковка; 9 — тензобаги; 10 — аналогово-цифровий перетворювач, що задає закон руху 11; 12 — електронний датчик тиску; 13 — регулятор тиску з пропорційним керуванням

Точність дозування в запропонованій структурній системі відслідковується контролером шляхом одночасного аналізу переміщення клапана дозатора та ваги рідкого харчового продукту в споживчій упаковці.

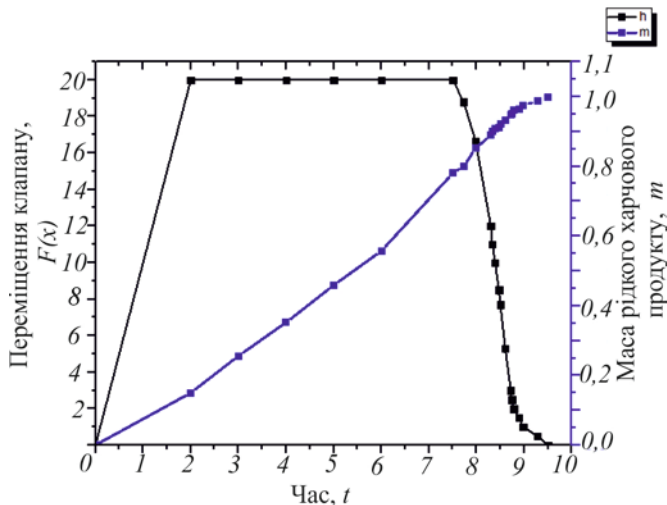
Для перевірки працездатності нової конструкції дозуючого пристрою та адекватності отриманих аналітичних результатів виготовлено експериментальну установку функціонального мехатронного модуля дозування рідкої харчової продукції з конічним клапаном (рис. 5). Робота системи керування мехатронного модуля базувалась на розробленій математичній моделі реалізації заданого закону руху клапана прецизійного дозатора.

Приводом дозатора в мехатронному модулі дозування є пневмоциліндр з гнучким корпусом, а сигналом керування ним — змінне значення тиску. Швидкість зміни тиску та його миттєве значення забезпечувалось за допомогою регулятора з пропорційним керуванням. Точність дозування відслідковувалась зворотним зв'язком — тензобагами контролю рідкого харчового продукту в споживчій упаковці. Всі кінематичні та динамічні параметри роботи мехатронного модуля дозування фіксувалися комп'ютером у режимі реального часу.



**Рис. 5.** Експериментальна установка функціонального мехатронного модуля дозування рідкої харчової продукції: 1 — бункер; 2 — кришка; 3 — лійка; 4 — пневмоциліндр з гнучким корпусом; 5 — сидло під конусний клапан; 6 — тензоваги; 7 — мірна смінь; 8 — аналогово-цифровий перетворювач; 9 — блок живлення; 10 — комп'ютер; 11 — регулятор тиску з пропорційним керуванням; 12 — електронний датчик тиску

На основі проведених експериментальних досліджень роботи функціонального мехатронного модуля дозування рідкої харчової продукції встановлена залежність зміни маси рідкого харчового продукту від часу та переміщення клапана прецизійного дозатора в реальному часі.



**Рис. 6.** Графік залежності переміщення клапана  $x(t)$  та зміни маси рідкого харчового продукту  $m$  від часу  $t$

Отримані характеристики роботи мехатронного модуля дозування рідкої продукції дають змогу внести подальші корективи в роботу системи керування та встановити залежність масових витрат рідкого харчового продукту як функцію зміни площі каналу дозування, який створюється між клапаном і сідлом ( $f$ ) та тиску повітря ( $P$ ) в пневмоциліндрі з гнучким корпусом (рис. 4).

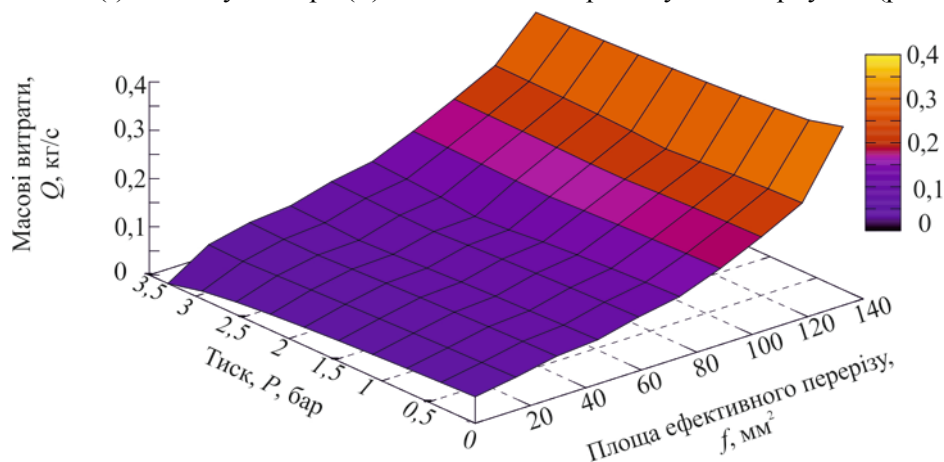


Рис. 7. Відгук масових витрат рідкого харчового продукту  $Q$  як функція зміни площі каналу дозування, що створюється між клапаном і сідлом ( $f$ ), і тиску повітря ( $P$ ) в пневмоциліндрі з гнучким корпусом

### Висновки

На основі проведених досліджень функціонального мехатронного модуля дозування рідкої харчової продукції встановлено, що масові витрати рідкого харчового продукту через канал системи подачі продукту в тару зростають лінійно до моменту, коли площа каналу дозування починає перевищувати  $80 \text{ мм}^2$ , після чого відбувається різке збільшення масових витрат до 40%. Зміна тиску повітря ( $P$ ) в пневмоциліндрі з гнучким корпусом компенсує похибку дозування, яка виникає внаслідок впливу тиску рідини на клапан і під час дозування. Отримані результати дослідження надають можливість у подальшому визначити коефіцієнти коригування для реалізації заданого закону руху клапана, забезпечити високу точність дозування та збільшити швидкодню дозатора.

### Література

1. Гавва О. М., Беспалько А. П., Волчко А. І., Кохан О. О. Пакувальне обладнання: підручник. Київ: ІАЦ Упаковка, 2010. 746 с.
2. Горчакова О. М., Якимчук М. В., Деренівська А. В., Беспалько А. П. Методологія проектування пакувальних машин на основі мехатронних модулів. *Харчова промисловість*. 2016. № 19. С. 105—112.
3. Якимчук М. В., Горчакова О. М., Токарчук С. В., Валулін Г. Р. Дослідження впливу тиску рідкого харчового продукту на закон переміщення клапана прецензійного дозатора. *Харчова промисловість*. 2018. № 24. С. 125—130.
4. Герц Е. В. Динамика пневматических систем машин. Москва: Машиностроение, 1985. 255 с.
5. Horchakova O., Iakymchuk M., Havva O., Mykhailyk B. Research of mechatronic modules of dosing weighing devices for liquid products. *Journal of Food and Packaging Science, Technique and Technologies*. 2017. No. 12. P. 27—32.