

УДК 664.346.028.2

SUBSTANTIATION OF THE DOSING MODULE PARAMETERS WITH PISTON INJECTION FOR VISCOUS FOOD PRODUCTS

V. Musiichuk, O. Gavva, O. Chepeliuk, O. Chepeliuk*National University of Food Technologies***Key words:**

dosing,
dosing module,
viscous product,
productivity,
piston,
modeling

Article history:

Received 02.04.2025

Received in revised form
15.04.2025

Accepted 22.04.2025

Corresponding author:

gavvaoleksandr@gmail.com

ABSTRACT

One of the operations in the technological scheme for the portioned food products production is their dosing. The problem of accurate dosing in the food industry is one of the key ones, determining its efficiency, material consumption and compliance with regulatory requirements. The manufacturing lines productivity also significantly depends on the speed of packaging operations in general and dosing in particular. The entire range of food products includes viscous products, the precise dosing of which is an important issue for the confectionery, canning, dairy processing and other industries.

The object of research is a semi-automatic volumetric dosing module of piston type with crane valves and pneumatic drive.

During the physical experiment, the effect of pressure and the configuration of the outlets on the product dose delivery by the piston dosing module was determined. Six series of experiments were conducted with different nozzles, the experiment in each series was repeated three times.

Dosing viscous products with a piston dosing module provides sufficient accuracy and performance. For uniform filling over the entire container area, it is advisable to direct the product through several channels, but this leads to an increase in hydraulic resistance. The most efficient dosing is achieved with the four-hole nozzle with a diameter of 8 mm for larger volumes and the three-hole nozzle with a diameter of 3.6 mm for smaller volumes.

The simulation of the process of dosing viscous food products in the SolidWorks Flow Simulation software package was performed for all six nozzle options under consideration and showed similar results to the physical experiments. The parameter that was compared was the product flow rate, m/s. The average product velocity of 1.68 m/s corresponds to the production data within an error of 5.2%.

DOI: 10.24263/2225-2916-2025-37-17

ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ДОЗУВАЛЬНОГО МОДУЛЯ З ПОРШНЕВИМ НАГНІТАННЯМ ДЛЯ В'ЯЗКИХ ХАРЧОВИХ ПРОДУКТІВ

В. М. Мусійчук, аспірант

О. М. Гавва, д-р техн. наук, ORCID ID: 0000-0003-2938-0230

О. М. Чепелюк, канд. техн. наук, ORCID ID: 0000-0001-6295-6305

О. О. Чепелюк, канд. техн. наук, ORCID ID: 0000-0002-5417-9398

Національний університет харчових технологій

Для дослідження процесу дозування в'язких харчових продуктів використані методи фізичного (виробничий експеримент) і обчислювального моделювання в пакеті Solid Works, додаток Flow Simulation. Дозування в'язкої продукції поршневым дозувальним модулем забезпечує достатню точність і продуктивність. Для рівномірного наповнення по всій площі тари доцільно спрямовувати продукт кількома каналами, однак це призводить до збільшення гіравлічного опору. Найбільш ефективно дозування відбувається з насадкою з чотирма отворами діаметром 8 мм для дозування більших об'ємів продукції та насадкою з трьома отворами діаметрами 3,6 мм для менших об'ємів.

Ключові слова: дозування, дозувальний модуль, в'язкий продукт, продуктивність, поршень, моделювання.

Вступ. Однією з операцій у технологічній схемі виробництва порційних харчових продуктів є їх дозування (за вагою, об'ємом, часом). Вагове дозування здійснюється за допомогою ваговимірювальних пристроїв (використовується переважно для сипкої продукції). Дозування рідин і в'язких продуктів здійснюється за об'ємом. При дозуванні за часом через отвір постійного перерізу при сталому тиску за одиницю часу проходить однакова кількість рідини.

Проблема точного дозування на підприємствах харчової промисловості є однією з ключових, визначаючи його ефективність, витрати матеріалів і дотримання вимог нормативних документів. Продуктивність технологічних ліній також значно залежить від швидкості виконання операцій пакування взагалі і дозування зокрема.

З усього асортименту харчових продуктів значну частину складають в'язкі продукти, точне дозування яких є актуальним питанням для кондитерської, консервної, молокопереробної та інших галузей [1, 2].

Огляд останніх досліджень і публікацій. Під час дозування здійснюється відокремлення визначеної дози продукту від загальної маси та переміщення її у певному напрямку. У процесі такого переміщення продукт (сировина, напівфабрикат) розтягується, стискається, зсувається, тобто перебуває в умовах складного напруженого стану, тому раціональний підбір режимів дозування і геометричних параметрів елементів обладнання має суттєвий вплив на фасування продукту.

Виробники обладнання з поршневым дозуванням підтверджують доцільність вибору дозувальних модулів саме такого типу для однорідних помірно в'язких продуктів. Завдяки поршню, що робить зворотно-поступальний рух, продукт спочатку забирається в заздалегідь встановленому об'ємі і потім видається в тару. Складнощі насамперед можуть виникати через особливості текстури і склад продуктів, особливо високов'язких та з дрібними включеннями, для яких складно забезпечити рівномірне

і точне наповнення дозувальної камери, а за наявності дрібних включень у продукті — ще й довговічність елементів робочих органів. Є проблеми і зі стабільністю доз, спричинених пульсацією потоку і зміною в'язкості продукту [3, 4].

Дозувальні модулі з примусовим переміщенням поршня за допомогою стисненого повітря, хоча і мають меншу вартість, порівняно з аналогічним обладнанням з механічним приводом в рух, але в процесі експлуатації вимагають значних витрат на обслуговування, є енергоємними і потребують надійної мережі стисненого повітря. Однак за умови використання поршневих нагнітачів для дозування рекомендованих видів матеріалів таке обладнання здатне забезпечити необхідну точність дозування з похибкою до 1%.

Розроблення ефективного технологічного обладнання для дозування і пакування в'язких харчових продуктів має проводитись з урахуванням фізико-хімічних і реологічних властивостей зазначених продуктів і їх впливу на робочі органи обладнання [5].

На точність дозування поршневими дозаторами, серед іншого, впливають первинні похибки виготовлення виконавчих механізмів і робочих органів дозувальних пристроїв — кривошипно-шатунного механізму та запірної арматури [8]. Інша вагома причина — наявність повітряних включень, які зменшують точність дозування при об'ємному принципі відмірювання дози. Використання ерліфтного об'ємного способу формування дози та електропневматичної системи автоматичного керування в обладнанні функціонально-модульної будови [9] є одним з варіантів вирішення цієї проблеми.

Дозувальні пристрої напірного витікання характеризуються наявністю розділювального елемента, встановленого у мірній місткості (поршень, еластична мембрана, сильфон тощо), що передає тиск рідині. Об'єм дози рідини визначається величиною переміщення розділювального елемента. Тому в тих випадках, коли розділювальний елемент потребує додаткових зусиль для його деформації (сильфон, мембрана) чи для переміщення (ущільнений чи важкий поршень), перепад тиску ΔP дозатора, необхідний для забезпечення витрати продукту, потрібно збільшити на величину напору $\Delta P_{\text{доп}}$, необхідного для подолання сил протидії [10].

Складність розроблення обладнання для дозування полягає в тому, що потрібно одночасно вирішувати цілий комплекс питань, до яких входить забезпечення точності дозування продукту, достатньо високої продуктивності обладнання, значного варіювання величини дози і асортименту продукції різної в'язкості при мінімальних витратах часу на переналадження.

Врахування зазначених питань під час створення методик розрахунку і проєктування окремих вузлів і механізмів обладнання для дозування в'язких продуктів можливе тільки на основі повного дослідження операцій переміщення продуктів у процесі дозування.

Мета досліджень: виявити можливі напрямки удосконалення конструкції елементів обладнання для поршневого дозування, визначити раціональні режими роботи для дозування в'язких харчових продуктів при забезпеченні заданої продуктивності дозатора.

Матеріали і методи. Об'єктом досліджень є напівавтоматичний об'ємний дозувальний модуль поршневого типу з крановою запірною арматурою та пневматичним приводом на робочому органі та запірній арматурі (без попереднього підігрівання продукту). Дозатор призначений для дозування (поділу на дози) рідких щільних і в'язких продуктів (молочні продукти, джеми, кетчупи, соуси тощо).

Продукт завантажується в приймальний бункер об'ємного дозатора і для видачі дози оператору необхідно ввімкнути дозатор в роботу. Також є можливість працювати на дозаторі в автоматичному режимі, коли оператор підставляє лише тару.

Дозувальний модуль (рис. 1, а) може використовуватися для фасування різного роду в'язких харчових продуктів, видавати порцію продукту в тару або упаковку. Наявний накопичувальний бункер дає змогу працювати з дуже густими продуктами, видавати дози точно і швидко.

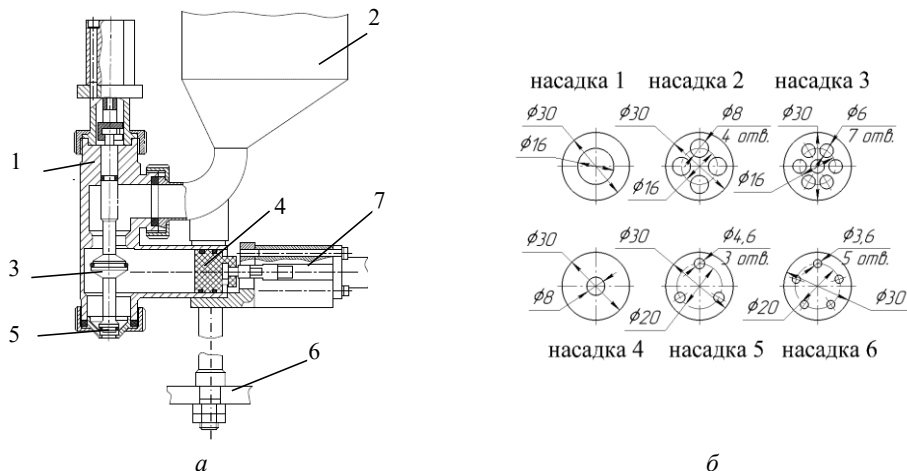


Рис. 1. Пневматичний поршневий дозувальний модуль: а — схема дозувального модуля; б — схема насадки: 1 — корпус; 2 — бункер; 3 — клапан; 4 — поршень; 5 — насадка; 6 — кріплення; 7 — пневмоциліндр

При дозуванні в'язких густих продуктів, зокрема соусів, молокопродуктів, є сенс розглянути можливість дозування продукції в тару через кілька отворів. Це надасть можливість заповнювати одразу більшу площу тари, що сприяє більш рівномірному заповненню і зменшує ймовірність піноутворення. На основі аналізу особливостей дозування в'язких продуктів було розроблено серію насадок, які можуть мати широке застосування і задовольнити розв'язок поставленої задачі (рис. 1, б). Процес дозування майонезу жирністю 20% досліджувався методом фізичного моделювання (виробничий експеримент) і шляхом проведення обчислювальних експериментів в пакеті Solid Works, додаток Flow Simulation.

Під час проведення фізичного експерименту визначався вплив тиску і конфігурації випускних отворів на видачу дози продукту. Проведені шість серій дослідів (насадки 1—6), експеримент в кожній серії повторювався тричі.

Важливим параметром є час, протягом якого поршень переміститься з одного крайнього положення в інше, а також вплив різних факторів і конструктивних параметрів на процес дозування. Для фіксування переміщення поршня пневмоциліндра застосовувалася відеокамера, розташована навпроти штока пневмоциліндра. Під штоком було прикріплено таровану паперову смугу та встановлено секундомір.

Принцип фіксування переміщення штока пневмоциліндра такий: під час руху поршня відеокамера фіксує переміщення штока. За рахунок того, що шток жорстко зв'язаний з пневмоциліндром, можемо вважати, що переміщення штока і поршня

пневмоциліндра однакові. Під час оброблення запису заносимо в таблицю дані переміщення штока в часі. Час визначено за допомогою секундоміра, встановленого в зоні знімання.

Величину виданої дози, за відомого переміщення поршня, визначаємо:

$$V = s \cdot \frac{\pi \cdot d_o^2}{4}, \quad (1)$$

де s — переміщення поршня пневмоциліндра; d_o — діаметр робочої порожнини дозатора.

Результати виробничих експериментів оброблені з використанням табличного процесора Microsoft Excel.

Експерименти, проведені у виробничих умовах, дають найбільш точні результати серед інших можливих методів досліджень, адже враховують усі особливості і випадкові явища реального процесу. Однак широке їх використання обмежено, зокрема й через суттєві матеріальні витрати. Тому доцільно створювати імітаційні моделі процесів, перевіряючи їх адекватність шляхом зіставлення з даними фізичних експериментів. Обчислювальний експеримент проведений в пакеті Solid Works, додаток Flow Simulation. Розглянуто дозування поршнеvim дозатором майонезу, жирність якого 20%, а течія описується рівнянням Гершеля-Балклі:

$$\tau = 90 + 30 \cdot \dot{\gamma}^{0,25}.$$

Результати досліджень. Дозувальні пристрої напірного витікання, як правило, працюють при змінному перепаді тиску на виконавчому пристрої і слугують стабілізуючою ланкою під час забезпечення заданого середнього значення витрат.

Найбільша продуктивність дозувального пристрою визначається максимальною частотою видачі окремих доз рідини при мінімальному перепаді тиску на дозувальному пристрої.

Частота коливань потоку визначається властивостями рідини, що дозується, такими як динамічний коефіцієнт в'язкості μ і об'ємна маса ρ , а також параметрами дозатора і магістралі, яка підводить, такими як перепад тиску ΔP , довжина магістралі, що підводить, l та її діаметр d , шорсткість труб ε , місцеві опори ξ і конструктивний фактор k . В загальному випадку:

$$f = \psi(\mu, \rho, \Delta P, l, d, \varepsilon, \xi, k).$$

Промислові дослідження підтверджують, найбільші зміни у процесі роботи спричиняє перепад тиску ΔP ; зміна μ і ρ впливає на 1—2 порядки менше, зміни значення ξ починають істотно позначатися лише під час зміни режиму руху рідини.

Перші три серії дослідів проведені для насадок 1, 2, 3 (рис. 1, б). Їх об'єднує сумарна площа поперечного перерізу отворів, яка дорівнює $2 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$ (насадка 1 — один отвір діаметром 16 мм, насадка 2 — чотири отвори діаметром 8 мм, насадка 3 — сім отворів діаметром 6 мм кожний).

На основі величини переміщення поршня за формулою (1) визначено видану дозу V за 1 с, отримані дані зведені в табл. 1 та наведені на рис. 2.

Збільшення кількості отворів в дозувальних насадках при однаковій загальній площі поперечного перерізу каналів дає змогу забезпечити більшу рівномірність заповнення тари продуктом, але має і зворотну сторону, пов'язану зі збільшенням опору для проходження продукту.

Таблиця 1. Результати серії дослідів для насадок 1—3

Тиск у робочій камері пневмоциліндра, МПа	Насадка 1		Насадка 2		Насадка 3	
	переміщення поршня, $s \cdot 10^3$, м	видана доза за 1 с, $V \cdot 10^6$, м ³	переміщення поршня, $s \cdot 10^3$, м	видана доза за 1 с, $V \cdot 10^6$, м ³	переміщення поршня, $s \cdot 10^3$, м	видана доза за 1 с, $V \cdot 10^6$, м ³
0,15	117,37	316	117,00	315	114,03	307
0,20	120,34	324	121,09	326	118,86	320
0,30	128,52	346	127,03	342	124,43	335
0,40	134,09	361	131,49	354	126,29	340

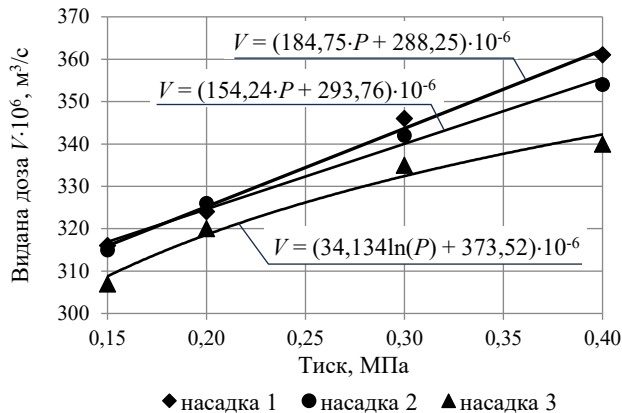


Рис. 2. Залежність між величиною тиску в робочій порожнині пневмоциліндра та продуктивністю дозатора для насадок 1—3

Наведені на рис. 2 залежності між величиною тиску в робочій порожнині пневмоциліндра та продуктивністю дозатора мають для насадок 1 і 2 лінійний характер. Але при збільшенні загального периметра отворів (насадка 3) залежність набуває логарифмічної форми, що підтверджує недоцільність суттєвого збільшення кількості отворів у насадці. При цьому необхідно підвищувати тиск повітря в пневмоциліндрі для забезпечення заданої продуктивності, що потребує додаткових енергетичних витрат.

Видана доза при дозуванні в'язких продуктів залежить від загального периметра отворів насадок, які використовуються (рис. 3).

Це обумовлено збільшенням поверхні контакту між шаром рухомого продукту і поверхнею каналів насадки, причому при різних тисках в порожнині робочого циліндра залежності є подібними — суттєве зменшення витрати спостерігається при значенні периметра 0,10—0,11 м. Відповідно, можна зробити висновок, що перевищувати ці значення для насадок з площею поперечного перерізу отворів 0,0002 м² недоцільно. Значення периметра 0,10—0,11 м відповідає насадці з отворами діаметром 8 мм в кількості 4 шт.

Наступні серії дослідів проведені для насадок 4, 5, 6 (рис. 1, б). Для кожної з них сумарна площа поперечного перерізу отворів дорівнює $5 \cdot 10^{-5}$ м² (насадка 4 — один отвір діаметром 8 мм, насадка 5 — три отвори діаметром 4,6 мм, насадка 6 — п'ять отворів діаметром 3,6 мм кожний). Їх результати узагальнені в табл. 2 і наведені на рис. 4.

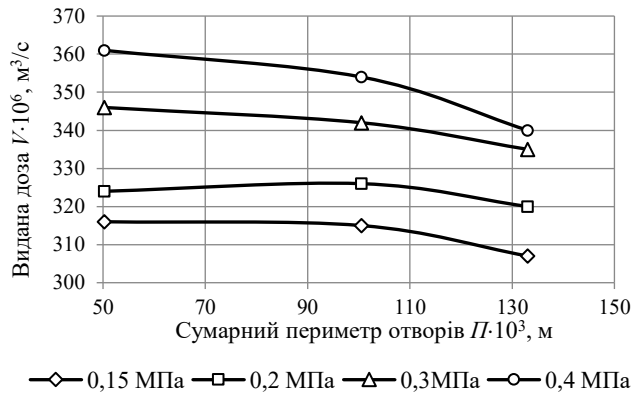


Рис. 3. Залежність витрати продукту від загального периметра отворів при різних тисках в робочій порожнині пневмоциліндра для насадок 1, 2, 3

Таблиця 2. Результати серії дослідів для насадок 4—6

Тиск у робочій камері пневмоциліндра, МПа	Насадка 4		Насадка 5		Насадка 6	
	переміщення поршня, $s \cdot 10^3, \text{ м}$	видана доза за 1 с, $V \cdot 10^6, \text{ м}^3$	переміщення поршня, $s \cdot 10^3, \text{ м}$	видана доза за 1 с, $V \cdot 10^6, \text{ м}^3$	переміщення поршня, $s \cdot 10^3, \text{ м}$	видана доза за 1 с, $V \cdot 10^6, \text{ м}^3$
0,15	109,94	296	105,12	283	98,06	264
0,20	113,66	306	109,20	294	101,77	274
0,30	119,23	321	113,29	305	106,23	286
0,40	124,80	336	118,86	320	116,63	314

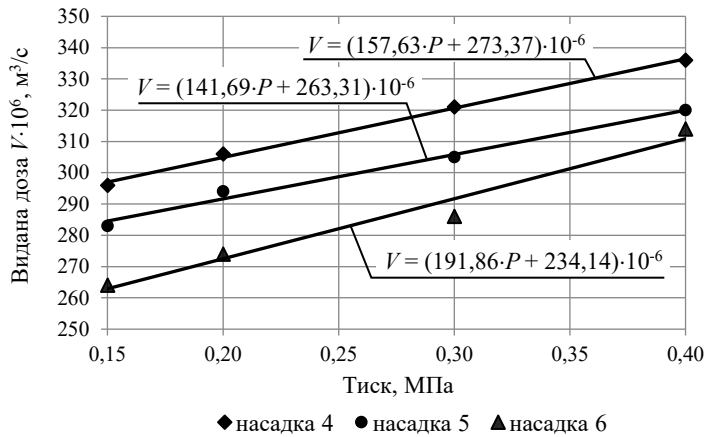


Рис. 4. Залежність між величиною тиску в робочій порожнині пневмоциліндра та продуктивністю дозатора для насадок 4, 5, 6

Для насадок 4 і 5, аналогічно насадкам 1—3, збільшення кількості отворів призводить до зменшення кута нахилу залежностей між величиною тиску в робочій порожнині пневмоциліндра та продуктивністю дозатора. Але для насадки 6 помітний інший тренд, що може бути пояснено можливою неточністю вимірювань для цієї

насадки при тиску 0,4 МПа, і, відповідно, потребує додаткових досліджень для цих значень.

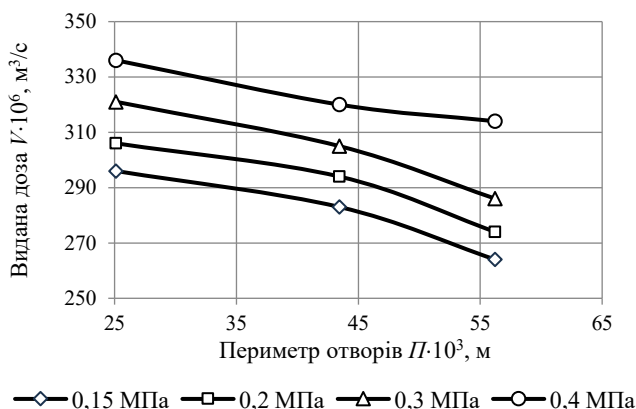


Рис. 5. Залежність витрати продукту від загального периметра отворів при різних тисках у робочій порожнині пневмоциліндра для насадок 4—6

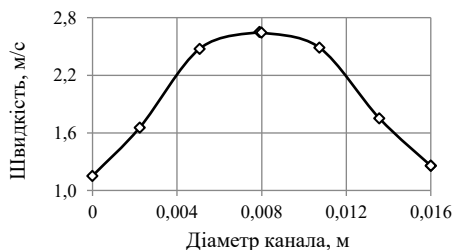
При використанні насадок з площею поперечного перерізу отворів $5 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2$ залежність між витратою продукту і загальним периметром отворів насадок має подібну закономірність — при збільшенні периметра видана доза зменшується. Особливо ця тенденція помітна при сумарному периметрі отворів орієнтовно від 45 мм, а це відповідає трьом-чотирьом отворам. Винятком є значення для тиску повітря в пневмоциліндрі 0,4 МПа, зокрема для насадки 6.

При витіканні маси через окремі отвори насадки швидкості в кожному отворі відрізняються між собою через різні значення відстані для проходження продукту. Це негативно впливало на точність при багатоканальному дозуванні, але оскільки дозування відбувається в одну тару, то важливим є сумарна маса продукту, яка проходить через усі отвори.

Імітаційне моделювання процесу дозування в'язких харчових продуктів у програмному комплексі SolidWorks Flow Simulation виконано для всіх шести розглянутих варіантів насадок і показало подібні до даних фізичних експериментів результати. Параметром, який зіставляли, була швидкість витікання продукту, м/с. На рис. 6 наведено графічні залежності зміни швидкості вздовж осі відвідного каналу (т. 0 відповідає крайній точці клапана) та в його поперечному перерізі. Усереднене значення швидкості продукту 1,68 м/с відповідає виробничим даним в межах похибки 5,2%.



а



б

Рис. 6. Зміна швидкостей продукту на виході з дозатора в повздовжньому (а) і поперечному (б) перерізах

Розроблена імітаційна модель надасть можливість аналізувати дозування інших харчових продуктів та визначати вплив зміни геометрії конструкційних елементів на цей процес. Зокрема, стає можливим дослідити вплив клапанів на цей процес і відслідкувати різні режими течії всередині дозатора (рис. 7).

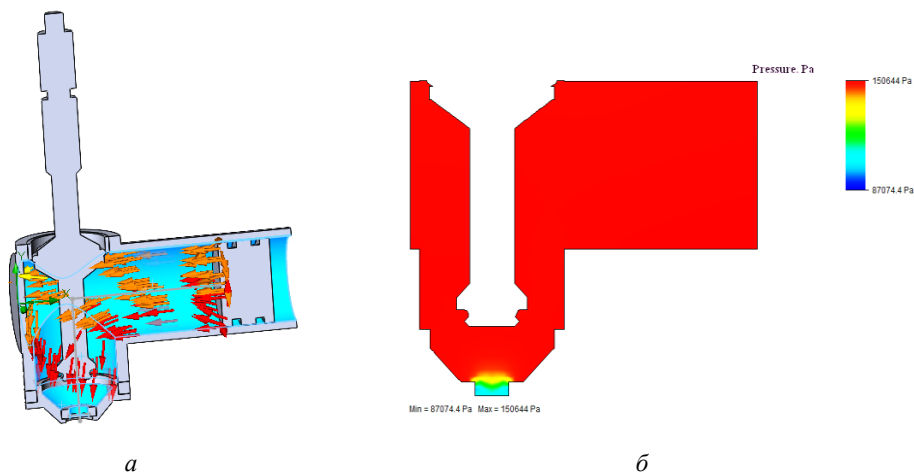


Рис. 7. Імітаційне моделювання процесу дозування в'язких харчових продуктів:

а — поле швидкостей; *б* — розподіл тиску в перерізі дозувального каналу

Висновки. Дозування в'язкої продукції поршневым дозувальним модулем забезпечує достатню точність і продуктивність. Для рівномірного наповнення по всій площі тари доцільно спрямовувати продукт кількома каналами, однак це призводить до збільшення гідралічного опору. Для випадку одночасного наповнення кількох одиниць тари це може бути критичним, для дозування в одну тару суттєвої втрати точності не відбувається. Для забезпечення видачі заданої дози соусів з жирністю 20% та аналогічних за густиною і в'язкістю продуктів доцільно використовувати насадку з чотирма отворами діаметром 8 мм для дозування більших об'ємів продукції та насадку з трьома отворами діаметрами 3,6 мм для менших об'ємів.

ЛІТЕРАТУРА

1. Гавва, О. М., Безпалько, А. П., Волчко, А. І., Кохан, О. О. (2010). *Пакувальне обладнання*: підручник. Київ: ІАЦ «Упаковка».
2. Волинець, Н. С., Федоров, С. Ф. (2012). Дослідження процесу дозування в'язких молочних продуктів з метою вдосконалення конструкції фасувального автомату М-2. *Ukrainian Food Journal*, 1(3), 54—58.
3. Гуць, В. С. (1999). Прикладна реологія та інтенсифікація процесів харчових виробництв: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Укр. держ. ун-т харч. техн.
4. Martinez-Padilla, L. (2023). Rheology of liquid foods under shear flow conditions: Recently used models. *Journal of Texture Studies*, 55. 10.1111/jtxs.12802.
5. Токарчук, С. В., Гавва, О. М., Чуприна, А. В. (2004). Модульна система проектування обладнання для пакування в'язких харчових продуктів. *Упаковка*, 4, 35—40.
6. Мусійчук, В. М., Гавва, О. М. (2002). Обладнання для дозування в'язких продуктів. *Упаковка*, 2, 36—38.
7. Мусійчук, В. М., Гавва, О. М. (2004). Дозування в'язких харчових продуктів дозаторами поршневого типу. *Упаковка*, 1, 20—22, 27.

8. Токарчук, С. В. (2009). Наукове обґрунтування параметрів функціональних модулів обладнання для пакування в'язких харчових продуктів у споживчу тару: автореф. дис. ... канд. техн. наук, Нац. ун-т харч. технологій.
9. Токарчук, С. В., Гавва, О. М., Кривопляс-Володіна, Л. О. (2009). Вплив точності виготовлення поршневого дозатора на точність дозування в'язких продуктів. *Упаковка*, 3, 46—49.
10. Гавва, О. М., Мусійчук, В. М. (2004). Розрахунок дозувальних пристроїв з пневматичним приводом для в'язких харчових продуктів. *Харчова промисловість*, 3, 149—151.