

PARAMETRIC SYNTHESIS OF A MECHATRONIC SYSTEM FOR PNEUMATIC CONVEYING OF BULK PRODUCTS

O. Zaporozhets, S. Volodin

National University of Food Technologies

Key words:

*Pneumatic conveying
Bulk food products
Mathematical modelling
Physical modelling
Mechatronic module
Dynamic control
Performance*

Article history:

Received 09.07.2024
Received in revised form
25.07.2024
Accepted 15.08.2024

Corresponding author:

O. Zaporozhets

E-mail:

npnuht@ukr.net

Citation: Запорожець О. В., Володін С. О. (2024). Параметричний синтез мехатронної системи пневмотранспортування сипких продуктів. *Наукові праці НУХТ*, 30(4), 79—89. DOI: 10.24263/2225-2924-2024-30-4-8

ABSTRACT

Increased productivity and the introduction of integrated control systems for pneumatic conveying systems require the development of new mathematical models. Existing models often do not take into account particle migration, hydrodynamic and electrical forces, which causes inaccuracies. Therefore, there is a need to develop flexible pneumatic transport automation systems that provide dynamic control of the transport process, increasing its productivity and reducing costs.

The aim of the study is to develop a mathematical and physical model of the process of pneumatic conveying of bulk food products, formalise critical control modes of the mechatronic module, investigate real boundary conditions for geometric, kinematic and dynamic parameters, and determine the limits of ensuring the required compressed air pressure distribution at a given product pipeline capacity.

To achieve this goal, the following were developed: an experimental pneumatic conveying mechatronic module, physical and mathematical models of the pneumatic conveying process.

As part of the study, the rational parameters of pneumatic conveying and possible energy consumption, depending on the characteristics of the material, were determined. It has been established that the number of transported product particles reaches a maximum within 0.1—0.2 seconds after the compressed air is supplied through the product pipeline. The compressed air flow rate is within 80—160 Nl/min depending on the pressure in the pipeline: 0.1—0.3 MPa. Based on the results of the study, a new approach to modelling pneumatic conveying systems in general is proposed, which makes it possible to take into account various factors affecting the conveying process.

ПАРАМЕТРИЧНИЙ СИНТЕЗ МЕХАТРОННОЇ СИСТЕМИ ПНЕВМОТРАСПОРТУВАННЯ СИПКИХ ПРОДУКТІВ

О. В. Запорожець, С. О. Володін

Національний університет харчових технологій

Зростання продуктивності та впровадження комплексних систем керування пневмотранспортними системами вимагають розроблення нових математичних моделей. Чинні моделі часто не враховують міграцію частинок, гідродинамічні та електричні сили, що обумовлює неточності, тому виникає потреба в розробці гнучких систем автоматизації пневмотранспорту, які забезпечують динамічне регулювання процесу транспортування, збільшуючи його продуктивність і зменшуючи витрати.

Метою дослідження є розробка математичної та фізичної моделі процесу пневмотранспортування сипких харчових продуктів, формалізація критичних режимів керування мехатронним модулем, дослідження реальних граничних умов для геометричних, кінематичних і динамічних параметрів, а також визначення меж забезпечення необхідного розподілу тиску стисненого повітря за заданої продуктивності продуктопроводу.

Для досягнення поставленої мети були розроблені: експериментальний пневмотранспортувальний мехатронний модуль, фізична і математична моделі процесу пневмотранспортування.

У межах дослідження було визначено раціональні параметри пневмотранспортування та можливі енергетичні витрати, що залежать від характеристик матеріалу. Встановлено, що кількість частинок продукту, що транспортується, досягає максимуму протягом 0,1–0,2 секунди після подачі стисненого повітря продуктопроводом. Витрати стисненого повітря в межах 80–160 Нл/хв залежно від величини тиску в магістралі: 0,1–0,3 МПа. На основі результатів дослідження запропоновано новий підхід до моделювання пневмотранспортних систем загалом, що дає змогу враховувати різні фактори, які впливають на процес транспортування.

Ключові слова: пневмотранспорт, сипкі харчові продукти, математичне моделювання, фізичне моделювання, мехатронний модуль, динамічне регулювання, продуктивність.

Постановка проблеми. Сучасні пневмотранспортні системи для сипких харчових продуктів мають особливості, пов'язані з їх проектуванням, експлуатацією й оптимізацією. Зростання продуктивності, впровадження комплексних систем керування потребують нових математичних моделей, які б формалізували реальні умови роботи. Наявні моделі часто не враховують міграцію частинок, гідродинамічні й електричні сили, що призводить до їх неточності. Актуальним завданням є розроблення гнучких систем автоматизації пневмотранспорту, які забезпечують динамічне регулювання процесу транспортування, збільшуючи його продуктивність і зменшуючи витрати.

Одним із перспективних напрямків досліджень є створення універсальної розрахункової моделі потоків під час пневмотранспортування до дозувально-фасувальних модулів обладнання, яка б враховувала властивості різних харчових продуктів.

Удосконалення пневмотранспортних систем потребує не лише розробки нових математичних моделей і систем керування, але й оптимізації параметрів мехатронних модулів. Обґрунтування цієї задачі пов'язане зі зростанням продуктивності пневмотранспорту, впровадженням комплексних систем керування та різними групами сипких харчових продуктів. Наукове вирішення та подальша ефективна реалізація параметричного синтезу мехатронної системи пневмотранспортування передбачає дослідження окремих функціональних модулів з урахуванням впливу різних факторів, використанням наукових методів аналізу й синтезу. Впровадження результатів дослідження дасть змогу підвищити продуктивність пневмотранспортних систем, надійність і безпечність роботи, зменшити енергоспоживання. Дослідження параметрів мехатронних модулів пневмотранспорту сипкої продукції є актуальним науковим завданням, вирішення якого сприятиме підвищенню ефективності обладнання харчової та пакувальної галузі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Кожна група продуктів має певні властивості, тому під час їх транспортування в пневматичній магістралі продуктопроводом необхідні відповідні параметри. А саме: геометрія робочих трубопроводів і режим обробки, який багато в чому залежить і від системи управління за тиском. Різноманітність пневмотранспортного обладнання на ринку зумовлена специфічними властивостями різних груп продуктів, які потребують відповідних параметрів транспортування. Відомі випадки, коли навіть найсучасніші пневматичні продуктопроводи, розроблені для певної групи дрібноштучних продуктів, не забезпечують необхідну продуктивність після заміни виробника. Цей фактор підкреслює важливість моделювання процесів роботи пневмотранспортних установок, якому приділяється значна увага протягом багатьох десятиліть (Orozovica, & Lavrinesca, 2020). У сучасних машинах для пакування харчових продуктів у споживчу тару поширене застосування клапанної системи з індивідуальним приводом на кожен клапан і мікропроцесорною системою налаштування оптимальних режимів технологічного процесу (Гавва, & Кривопляс-Володіна, 2023). Результатами досліджень встановлено, що застосування емпіричних методик не забезпечує повного розрахунку установок пневмотранспортування, включно зі зміною характеристик двокomпонентного потоку за умови різних режимів роботи (Ghafo-ri, 2018). Застосування універсального теоретичного опису процесу пневмотранспортування ускладнюється складною системою диференціальних рівнянь, що робить пряме їх розв'язання вельми проблематичним. Невирішеними залишаються питання, пов'язані з аналітичним описом взаємодій між частинками під час транспортування та зі стінками каналу. Це підкреслює важливість використання методів фізичного моделювання для розв'язання складних задач такого типу (Zhang, & Bénard, 2012). У праці (Tolma , & Prvulovi , 2017) автори розширили результати досліджень щодо процесу перероблення зерна в пневмотранспортній системі. Окр м к льк сної  люстрації процесу транспортування, вони описали режими перепад  тисків на вході та виході продуктопроводу, а також вплив абразивного зно-

су трубопроводу та проточних елементів моделі. Дослідження пневмотранспортування з використанням стандартного обладнання та серійного компресора підвищення тиску (Mošorinski, & Prvulović, 2017) демонструють недолік моделей відкритого та закритого типів, оскільки вони не враховують критичну швидкість у вертикальних ділянках транспортного каналу. Дослідження (Shishkin, & Shishkin, 2020) також застосовують універсальну залежність Зенца в логарифмічному масштабі для випадку транспортування суміші. Експерименти з пшеницею, висівками та гранульованими дріжджами підтвердили загальну закономірність режиму пневмотранспортування. Забезпечення транспортування обґрунтоване повітряною швидкістю, що в 1,5—1,8 раза перевищує розрахункову. Хоча це важливо для розрахунку продуктивності, загального споживання стисненого повітря та стабільності подачі продукту, такий підхід може призвести до значних похибок. (El-Kholy, & Kamel Reham, 2021).

У (Gan, & Yu, 2016) описано математичну модель двофазної течії сипучого матеріалу в нагнітальному пневмоприводі, яка враховує звуження, розширення та повороти пневмотраси за допомогою різних коефіцієнтів гідравлічного опору. Експерименти та чисельні розрахунки (Wang, & Cheng, 2023), проведені з використанням запропонованої моделі, продемонстрували типовий розподіл швидкості перенесення маси частинок і тиску вздовж траси. Однак частинка розглядалася як матеріальна точка, без урахування впливу змін навколишнього середовища (Li, & Tang, 2023).

Пояснення явищ, що відбуваються під час руху аеросумішей у пневмотранспортному трубопроводі, може слугувати методом подолання проблем, пов'язаних з пневмотранспортуванням (Sethi, & Rawat, 2022). Описаний підхід (Shijo, & Behera, 2023) дав змогу сформулювати та реалізувати ряд нових технічних рішень щодо вдосконалення пневмотранспорту сипких матеріалів, але заснованих виключно на використанні структурованих режимів руху аеросумішей.

Наведені результати досліджень не дають остаточних рекомендацій щодо оптимальних режимів пневмотранспортування та методики регулювання потоком продукції. Проведений аналіз результатів виконаних досліджень підтвердив їх недостатність для створення нових зразків пневмотранспортувальних мехатронно-керованих модулів для сипкої харчової продукції, в яких передбачено регулювання потоку продукції клапанним елементом.

Метою дослідження є математичне та фізичне моделювання процесу пневмотранспортування сипких харчових продуктів, а також формалізація критичних режимів керування мехатронним модулем.

Для досягнення сформульованої мети дослідження передбачено вирішення **таких завдань:**

- розробити експериментальний пневмотранспортувальний мехатронний модуль з дослідження режимів пневмотранспортування сипких харчових продуктів;
- дослідити реальні граничні умови для геометричних, кінематичних і динамічних параметрів;
- узагальнити раціональні параметри під час дослідження процесу транспортування сипких продуктів у робочому пневмопродуктопроводі для забезпечення етапу фізичного моделювання;

- визначити межі забезпечення необхідного розподілу тиску стисненого повітря за заданої продуктивності продуктопроводу.

Матеріали і методи. Як матеріали дослідження обрано пневмотранспортувальний технологічний мехатронний модуль. Предметом дослідження є процеси пневмотранспортування сипучих харчових продуктів (гречана крупа) у робочому пневмопродуктопроводі. За гранулометричним складом (Panasiewicz, 1995) гречана крупа відноситься до класу незв'язних дрібнодисперсних сухих сипучих продуктів, другої групи (розмір частинки у межах 3—5 мм), здатних до гідравлічного витікання через отвори, які незначно (у 5—7 разів) перевищують діаметр частинок.

Методи дослідження ґрунтуються на фундаментальних законах гідродинаміки сипких середовищ у пневмотранспорті (Modrzewski, & Wodziński, 2004; Molenda, & Stasiak, 2021) та теорії вирішення звичайних диференціальних рівнянь. В рамках дослідження враховано статичні та динамічні характеристики керуючої системи мехатронного модуля підведення стисненого повітря у продуктопровід (Olszewski, 1995; Panasiewicz, 1999). З метою поліпшення метрологічних характеристик системи автоматизованого дозування проведено вибір конструктивних параметрів модуля.

Основними припущеннями під час моделювання (Schmidt, 1997; Wewer, 2000) є: сипка харчова продукція за фізико-механічними властивостями наближена до моделі псевдозрідженого шару; процес обертання частинок у газовому потоці пов'язаний з відсутністю сферичності форми, наявністю ударної взаємодії між частинками й стінкою продуктопроводу, а також наявністю ефекту закручування частинок окремими дрібними турбулентними вихорами.

Викладення основних результатів дослідження. Для проведення досліджень розроблено системи управління потоком, які дають змогу реалізовувати різні закони пневмотранспортування сипкого продукту.

Для встановлення функціональної залежності між геометричними параметрами пневмотранспортного продуктопроводу, мехатронною системою розподілення потоку сипучої продукції та гідродинамічними характеристиками руху стисненого повітря в трубопроводі запропоновано комплексний підхід. Він ґрунтується на аналітичному та фізичному моделюванні режимів керування й руху продукції в каналах продуктопроводу. Процес пневмотранспортування, керований імпульсами стисненого повітря, що обумовлюють робочі режими мехатронного модуля.

Потік стисненого повітря формується на вході в каналі продуктопроводу, за допомогою пневмоклапана, який керується генерацією струму відповідно функції Хевісайда. Значення струму (з роздільною здатністю 0,001 мА) кероване в межах $I_{\max}$, $I_{\min}$ = 4...20 мА, із робочими діапазонами 4,1 мА...19,9 мА; 12 мА...19,9 мА. Витратна характеристика пневмоклапана мехатронного модуля — 180 Нл/хв. Тривалість періоду функції керування до 0,3 с.

Для керування потоком стисненого повітря у вертикальному каналі обрано комбінацію системи керування зі зворотним зв'язком у форматі струмової петлі 4...20 мА. Мехатронний модуль (рис. 1) дає змогу динамічно регулювати подачу повітря, забезпечуючи оптимальні умови пневмотранспортування сипкої продукції. Система містить контролер із сигналами зворотного зв'язку від датчика тиску повітря і витратоміра. За сигналом датчика, контролер генерує сигнал, що подається на електромагнітний клапан. Електромагнітний клапан регулює подачу повітря до пневмотранспортної системи. Система керування, представлена на рис. 1,

сформована на елементах Камоцці, складається із драйверів серії 130 для керування пропорційними розподільниками клапанного типу AP (2/2); електронного датчика/реле тиску серії SWCN для вимірювання та контролю тиску повітря; бустера 40M2L100A120MC02 для підсилення тиску повітря. ШІМ-сигнал, генерований драйвером, подається на котушку соленоїда електромагнітного клапана для подачі стисненого повітря в систему вертикального каналу продуктопроводу. Частота сигналу може досягати 500 Гц, а напруга живлення в ланцюзі керування становить 24VDC ($\pm 10\%$), що відповідає параметрам пропорційного розподільника AP.

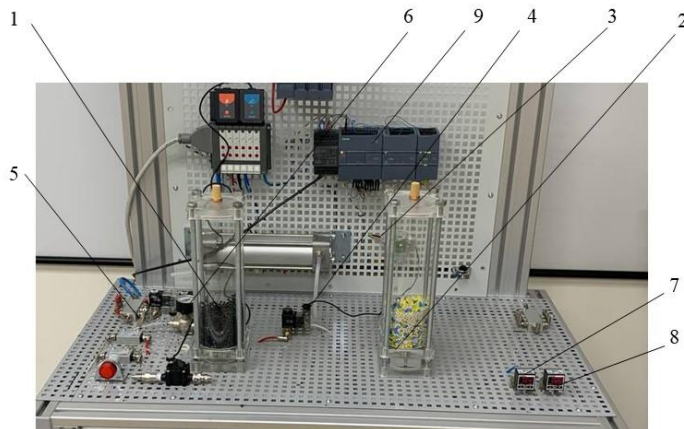


Рис. 1. Вид експериментального пневмотранспортувального мехатронного модуля для дослідження режимів пневмотранспортування сипких харчових продуктів: 1, 2 — вертикальні транспортувальні канали; 3, 5 — драйвери з пропорційним відтворенням імпульсу стисненого повітря; 4, 6 — 2/2 пропорційні розподільники прямої дії; 7, 8 — аналогові електронні реле (вакуум/тиск); 9 — пристрій формування закону зміни струмового сигналу

Узагальнені витрати стисненого повітря залежать від величини вхідного магістрального тиску P (0,1...0,3 МПа) у межах 80...160 (Нл/хв). В основі автоматизації пневмотранспортних систем лежить математична модель, яка описує рух частинок сипкої продукції в нерозривному потоці щільної фази. Для керування потоком стисненого повітря у вертикальному каналі було обрано комбінацію системи керування зі зворотним зв'язком у форматі струмової петлі 4..20 мА. Ця система дає змогу динамічно регулювати подачу повітря, забезпечуючи оптимальні умови пневмотранспортування сипкої продукції. Система містить (рис. 1) контролер, який отримує сигнал зворотного зв'язку від датчика тиску повітря. На основі цього сигналу контролер генерує керуючий сигнал, який подається на електромагнітний клапан. Електромагнітний клапан регулює подачу повітря до пневмотранспортної системи. Важливою характеристикою системи є можливість регулювання керуючого сигналу за струмом на керуючому соленоїді протягом 0,5 с. Це дозволяє контролеру швидко реагувати на зміни умов транспортування та забезпечувати точне регулювання потоку повітря.

Під час зіткнення частинок (рис. 2) та стінки трубопроводу розраховується швидкість після відскоку від поверхні. При цьому враховуються можливі траєкторії руху частинки. Кінематичні параметри частинок після ударного імпульсу з поверхнею продуктопроводу обчислено з радіусом сферичної частинки $r=d/2$. У моделі всі параметри, враховані після удару, мають позначення (*).

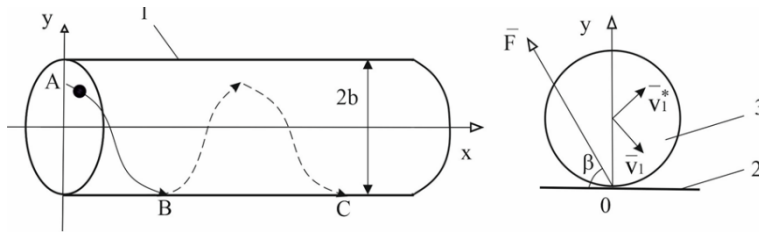


Рис. 2. Розрахункова схема кінематичних характеристик частинки для досліджуваного режиму пневмотранспортування: 1 — робочий трубопровід, 2 — внутрішня поверхня трубопроводу, 3 — частинка сипучого продукту

Математичне моделювання ґрунтується на формалізації руху сферичної частинки в турбулентному повітряному потоці радіусом r' , густиною ρ' . Вхідні параметри моделювання струменевого потоку в продуктопроводі: газ, потік стаціонарний, в'язкість кінематична $\nu = \mu / \rho$ (μ — в'язкість динамічна, ρ — густина. Опір руху частинки відносно повітря (газу) описано за нелінійним законом. Частинка в руболі знаходиться під впливом сили тяжіння $G = \rho' g' (H)$, де g' — вектор прискорення сили тяжіння. Для конкретизації результатів моделювання приймаємо: $g = 9,81$ (м·с⁻²); $\rho' = 1,25 \cdot 10^{-3}$ (кг·м⁻³); $r' = 3 \cdot 10^{-3}$ (м); $\rho = 1,24 \cdot 10^{-3}$ (кг·м⁻³); потік повітря рухається із швидкістю $v_m = 20$ (м·с⁻¹); $\mu = 1,82 \cdot 10^{-5}$ кг/(м·с); продуктопровід радіусом $b = 0,05$ м. Під дією стисненого повітря, частинка продукту формує обертальний рух, який описано рівнянням (1) — (2) за схемою (рис. 2):

$$\frac{\pi}{6} (2 \cdot r')^3 \rho' \frac{du_i}{dt} = D' (v_i - u_i) + G_i + F_s, \quad (1)$$

де $i = x, y, z$; v_i — вектор швидкості (проекція) $\bar{v}$ стисненого повітря, u_i — вектор швидкості (проекція) $\bar{u}$ продукту відносно до нерухомої системи координат x, y, z . F_i — проекція вектора сили Рубінова-Келлера, що діє на сферичну поверхню частинки з боку стисненого повітря під час обертання. G_i — проекція вектора сили тяжіння на частинку продукту. Опис руху частинки у повітрі із впливом зовнішніх чинників наведено у рівнянні (2):

$$D' = 6\pi\mu r' \left(1 + 0,065 \left(\frac{2}{\mu} r' \rho' (\sqrt{u} - \bar{v}) \right) \right)^{\frac{3}{2}}. \quad (2)$$

Спільний опис рівняння для визначення обертального руху частинок та рівняння руху наведено рівнянням (3):

$$\begin{cases} \frac{4}{3} \pi \cdot r'^3 \cdot \rho' \cdot \frac{du_x}{dt} = D' (v_x - u_x) + G_x + F_x, \\ \frac{4}{3} \pi \cdot r'^3 \cdot \rho' \cdot \frac{du_y}{dt} = D' (v_y - u_y) + G_y + F_y, \\ J \cdot \frac{d\omega}{dt} = -\pi\mu (2 \cdot r')^3 \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot \frac{\partial v_x}{\partial y} - \omega \right). \end{cases} \quad (3)$$

де $\omega = \omega_z$ — проекція осі z для вектора від кутової швидкості обертання частинки;
 J — момент інерції частинки відносно центральної осі, паралельної до Oz :

$$J = \left\{ \pi \cdot (2 \cdot r')^5 \rho' \right\} / 60.$$

Значення проєкцій вектора швидкості на координаті осі u_x, u_y у початковий момент руху опишемо за рівняннями (4):

$$u_x = \frac{dx}{dt}; \quad u_y = \frac{dy}{dt}; \quad (4)$$

Спроєктувавши сили на осі координат (5)—(6), у прямокутній системі координат x, y , де вісь Ox спрямована вздовж потоку по стінці труби, визначальна система рівнянь руху частинки матиме характеристики:

$$G_y = -\frac{1}{6} \pi \cdot (2 \cdot r')^3 \rho' g, \quad G_x = 0, \quad (5)$$

$$F_x = \frac{\pi}{8} (2 \cdot r')^3 \rho' \omega (v_y - u_y), \quad F_y = -\frac{\pi}{8} (2 \cdot r')^3 \rho' \omega (v_x - u_x). \quad (6)$$

Після підстановки (4)—(6) у систему (3) отримаємо перетворення системи рівняннями (7)—(9) для опису моменту інерції частинки відносно її центральної осі, паралельної Oz :

$$\begin{aligned} \frac{4}{3} \pi \cdot r'^3 \rho' \frac{d^2 x}{dt^2} = 6 \cdot \pi \mu r' \cdot \left(1 + 0,065 \cdot \left(\frac{2}{\mu} r' \rho' \cdot \sqrt{\left(\frac{dx}{dt} - v_x \right)^2 + \left(\frac{dy}{dt} - v_y \right)^2} \right)^{\frac{2}{3}} \right)^{\frac{3}{2}} \times \dots \\ \dots \times \left(v_x - \frac{dx}{dt} \right) + \frac{\pi}{8} \cdot \rho' (2 \cdot r')^3 \cdot \omega \cdot \left(v_y - \frac{dy}{dt} \right), \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \frac{4}{3} \pi \cdot r'^3 \rho' \frac{d^2 y}{dt^2} = 6 \cdot \pi \mu r' \cdot \left(1 + 0,065 \cdot \left(\frac{2}{\mu} r' \rho' \cdot \sqrt{\left(\frac{dx}{dt} - v_x \right)^2 + \left(\frac{dy}{dt} - v_y \right)^2} \right)^{\frac{2}{3}} \right)^{\frac{3}{2}} \times \dots \\ \dots \times \left(v_y - \frac{dy}{dt} \right) - \frac{1}{6} \cdot \pi \rho' \cdot g (2 \cdot r')^3 - \frac{\pi}{8} \cdot \rho' \omega (2 \cdot r')^3 \cdot \left(v_x - \frac{dx}{dt} \right), \end{aligned} \quad (8)$$

$$J \cdot \frac{d\omega}{dt} = -\pi \mu (2 \cdot r')^3 \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot \frac{\partial v_x}{\partial y} - \omega \right), \quad (9)$$

де b — радіус труби продуктопроводу (м); v_m — для турбулентної течії у шарі, за рівнянням (10)—(11), де $u \in [0, 2b]$, $0 \leq y \leq b$:

$$v_x = v_m \left(\frac{y}{b} \right)^{\frac{1}{7}}; \quad v_y = 0; \quad \frac{\partial v_x}{\partial y} = \frac{1}{7} v_m \left(\frac{1}{by^6} \right)^{\frac{1}{7}}. \quad (10)$$

Якщо $b \leq y \leq 2b$:

$$v_x = v_m \left(\frac{2b-y}{b} \right)^{\frac{1}{7}}; \quad v_y = 0; \quad \frac{\partial v_x}{\partial v_y} = \frac{1}{7} v_m \frac{1}{b} \left(\frac{b}{2b-y} \right)^{\frac{6}{7}}. \quad (11)$$

Система рівнянь (3) буде описана як:

$$\begin{aligned} \frac{4}{3} \pi \cdot r'^3 \rho' \frac{d^2 y}{dt^2} = -6 \cdot \pi \mu r' \cdot \left(1 + 0,065 \cdot \left(\frac{2}{\mu} r' \rho' \cdot \sqrt{\left(\frac{dx}{dt} - v_x \right)^2 + \left(\frac{dy}{dt} \right)^2} \right)^{\frac{2}{3}} \right)^{\frac{3}{2}} \frac{dy}{dt} - \dots \\ \dots - \frac{4}{3} \pi \cdot \rho' (r')^3 - \pi \cdot \rho' (r')^3 \cdot \omega \cdot \left(v_x - \frac{dx}{dt} \right), \end{aligned} \quad (12)$$

Остаточне рівняння (13) опису дії в точці зіткнення частинки зі стінкою, наприклад, у точці В труби, слід обчислити швидкості u та ω після відскоку частинки від стінки, прийнявши за початкові умови для руху частинки на ділянці ВС, за (рис. 2), для траєкторії частинки:

$$J \cdot \frac{d\omega}{dt} = -\pi \mu (2 \cdot r')^3 \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot \frac{\partial v_x}{\partial y} - \omega \right). \quad (13)$$

Для визначення п'яти довільних констант інтегрування в системі рівнянь динаміки частинки, що рухається в полі сил Рубінова-Келлера, використовуються такі початкові умови:

- координати частинки в початковий момент часу $x(0)=x_0$, де x_0 — початкова координата частинки по осі X ; $y(0)=y_0$, де y_0 — початкова координата частинки по осі Y ;

- проєкції вектора швидкості частинки в початковий момент часу: $x(0)=Vx_0$, де Vx_0 — початкова проєкція вектора швидкості частинки на вісь X ; $Vy(0)=Vy_0$, де Vy_0 — початкова проєкція вектора швидкості частинки на вісь Y ;

- кутова швидкість обертання частинки в початковий момент часу: $\omega(0)=\omega_0$, де ω_0 — початкова кутова швидкість обертання частинки.

Початкове значення кутового прискорення: $\alpha(0)=\alpha_0$, де α_0 — початкове значення кутового прискорення.

Результати розрахунку запропонованої математичної моделі наведено на рис. 3. Перший етап: вихід установки на стаціонарний режим пневмотранспортування. Накопичення повітря в подавальному ресивері (рис.1) призводить до зростання його швидкості й тиску (рис. 3, а). Стаціонарний режим характеризується постійними значеннями швидкості й тиску повітря протягом роботи установки з урахуванням режиму транспортування. Швидкість і тиск повітря на вході є ключовими факторами для початку транспортування продукту.

Другий етап: сталий режим транспортування продукту. Розгін матеріалу відбувається протягом 0,1...0,3 с і залежить від попередньо встановлених режимів управління подачі стисненого повітря. На рис. 3, б чітко видно розподіли лінійної швидкості переміщення сипкого продукту під час руху в каналі продуктопроводу під тиском. Це підтверджує результати моделювання щодо впливу місцевих опорів на підвищення питомих втрат тиску.

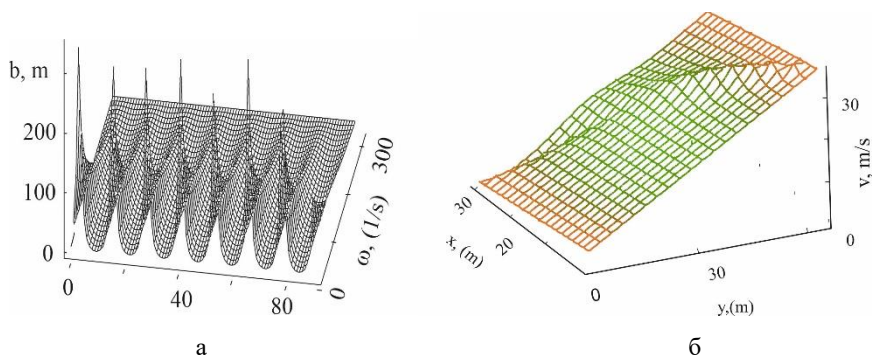


Рис. 3. Характеристика параметрів транспортування сипкого продукту у продуктопроводі: а — кутова швидкість ω руху частинки після зіткнення із стінкою трубопроводу; б — лінійна швидкість переміщення сипкого продукту v за час руху у каналі під тиском

Висновки

1. Розроблено фізичну модель експериментального пневмотранспортного мехатронного модуля з дослідження режимів пневмотранспортування сипких харчових продуктів, що забезпечує роботу схеми передавання керувального сигналу для імпульсної подачі стисненого повітря у вертикальному трубопроводі з урахуванням впровадження елементної пропорційної пневматичної техніки.

2. Опрацьована математична модель процесу транспортування сипучих харчових продуктів. Модель базується на диференціальних рівняннях руху окремих частинок у повітряному потоці, а також враховує поведінку частинок у процесі зіткнення за прийнятими граничними умовами. Граничні умови сформовані з урахуванням впливу режимів транспортування сипких харчових продуктів і геометрії каналів продуктопроводу. В ході теоретичних досліджень визначено раціональні параметри важливі для процесу керування і пневмотранспортування продукту. Радіус частинки сипкого продукту $r' = 3 \cdot 10^{-3}$ (м); густина окремої частинки сипкого продукту $\rho' = 1,25 \cdot 10^{-3}$ (кг·м⁻³); густина енергоносія (повітря) $\rho = 1,24 \cdot 10^{-3}$ (кг·м⁻³); максимальна швидкість потоку $v_m = 20$ (м·с⁻¹); динамічна в'язкість $\mu = 1,82 \cdot 10^{-5}$ кг/(м·с); радіус продуктопроводу $b = 0,05$ м.

3. Аналіз результатів моделювання довів, що загальні втрати тиску в трубопроводі пневмотранспортування складаються з таких чинників: втрат тиску, обумовлених фрикційними взаємодіями між потоком повітря та стінками трубопроводу; ударами частинок об стінки, втрат тиску на підтримання матеріалу, що транспортується у зваженому стані на вертикальній ділянці; втрат тиску на розгін частинок під час їх руху у пневмотранспортний канал.

Література

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.

El-Kholy, M. M., Kamel, R. M. (2021). Development and Evaluation of an Innovative Grain Cart with a Pneumatic Conveyor. *Heliyon*, 33, 17—31. doi:10.1016/j.heliyon.2021.e08461.

- Gan, J. Q., Yu, A. B. (2016). A GPU-based DEM approach for modelling of articulate systems. *Powder Technology*, 301, 1172—1182. doi:10.1016/j.powtec.2016.07.072.
- Ghafori, H. (2018). Numerical and experimental study of an innovative pipeline design in a granular pneumatic-conveying system. *Particuology*, 38, 196—203. doi:10.1016/j.partic.2017.07.007.
- Li, J., Tang, Z. (2023). Deep learning-based tomographic imaging of ECT for characterizing particle distribution in circulating fluidized bed. *AIChE Journal*, 69. doi:10.1002/aic.18055.
- Modrzewski, P., Wodziński, P. (2004). Circling-and-revolving screen, various design versions. *Zeszyty Naukowe Politechniki Łódzkiej. Inżynieria chemiczna i procesowa*, 27, 205—213.
- Molenda, M., Stasiak, M. (2021). Influence of seeds shape and internal structure of the sample on angle of internal friction. *Acta Agrophysica*, 2003(82), 131—137.
- Mośorinski, P., Prvulović, S. (2017). Improving the characteristics of pneumatic transport of grain. *Journal of Agricultural Engineering Science*, 15(3), 433, 218—224. doi:10.5937/jaes15-12734.
- Mośorinski, P., Prvulovic, S., Palinkaš, I. (2017). Improving the characteristics of pneumatic transport of grain. *Journal of Applied Engineering Science*, 15(3). doi:10.5937/jaes15-12734.
- Olszewski, A. (1995). Pneumatic transport in the mill. *Przegląd Zbożowo-Młynarski*, 7, 22—29.
- Orozovica, A., Lavrineca, A. (2020). Transport boundaries and prediction of the slug velocity and layer fraction in horizontal slug flow pneumatic conveying. *Chemical Engineering Science*, 227, 247—257. doi:10.1016/j.ces.2020.115916.
- Panasiewicz, M. (1995). Pneumatic separation process of leaves made from lupine seed disintegration process. *Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych*, 424, 297—302.
- Panasiewicz, M. (1999). Analysis of the pneumatic separation process of agricultural materials. *International agrophysics*, 13(2), 233—239.
- Schmidt, P. (1997). Das Siebklassiren. *Chem. Ing. Tech.*, 56, 12, 38—57.
- Sethi, A. K., Rawat, A. (2022). Artificial neural network models for wall parameters on plug-1 flow characteristics through pipelines. *Journal of Engineering Research*, 10. doi:10.36909/jer.ICMET.17203.
- Shijo, J. S., Behera, N. (2023). Prediction of flow mode transition in pneumatic conveying of fine particles using CFD. *Particulate Science and Technology*, 41, 297—310. doi:10.1080/02726351.2022.2081828.
- Shishkin, S., Shishkin, A. (2020). Calculation of Pressure Losses During Pneumatic Transport. *Refractories and Industrial Ceramics*, 60. doi:10.1007/s11148-020-00419-x.
- Wang, Y., Cheng, X. Z. (2023). A gas-solid flow pattern identification algorithm based on cross-rod electrostatic sensor array. *Measurement Science and Technology*, 34(1). doi:10.1145/3208854.3208892.
- Wewer, M. (2000). Wilgotność procesu fluidyzacji w sortowaniu produktów rolnych. *Prz. Tech. Rol.*, 3, 28—37.
- Zhang, P., Roberts, R. M., Bénard, A. (2012). Computational guidelines and an empirical model for particle deposition in curved pipes using an Eulerian-Lagrangian approach. *Journal of Aerosol Science*, 53, 1—20. doi: 10.1016/j.jaerosci.2012.05.007.