

УДК 621.88

DOI 10.36910/10.36910/6775-2313-5352-2025-27-13

<sup>1</sup>Клендій М. Б., <sup>1</sup>Драган А. П., <sup>2</sup>Пилипець М. І.<sup>1</sup>ВП НУБіП України «Бережанський агротехнічний інститут»<sup>2</sup>Тернопільський національний технічний університет ім. І. Пулюя

## ДО ПИТАННЯ ВИЗНАЧЕННЯ МОМЕНТУ ІНЕРЦІЇ ГВИНТОВОГО КОНВЕЄРА ІЗ СЕКЦІЙНИМ РОБОЧИМ ОРГАНОМ

*У статті наведено результати теоретичних досліджень моменту інерції гвинтових конвеєрів із секційними робочими органами для трьох режимів роботи: тихохідного, середньошвидкісного та швидкохідного. Розроблено аналітичні залежності для визначення моментів інерції гнучких гвинтових конвеєрів з урахуванням маси транспортованого сипкого матеріалу, кінематичних параметрів і конструктивних особливостей секційного робочого органу. Встановлено вплив механіко-технологічних властивостей сипкого матеріалу на динамічні характеристики гнучких конвеєрів та взаємозв'язок між моментом інерції і режимом їх роботи. Отримані залежності дозволяють уточнити математичні моделі руху матеріалу в конвеєрах, що сприятиме підвищенню точності розрахунків при проєктуванні транспортно-технологічних систем. Результати дослідження можуть бути використані при розробленні нових конструкцій гнучких шнекових механізмів з поліпшеними експлуатаційними характеристиками.*

**Ключові слова:** гвинтовий конвеєр, секційний робочий орган, момент інерції, сипкий матеріал.

**Постановка проблеми.** При роботі більшості гнучких гвинтових конвеєрів зазвичай виникають певні динамічні навантаження, які залежать від маси матеріалу що транспортується, моменту інерції гнучкого секційного конвеєра, кінематичних характеристик робочого органу гнучкого гвинтового конвеєра, а також спричиняються неточністю складання і регулювання ланок кінематичного ланцюга гвинтового конвеєра. На практиці при транспортуванні сипких матеріалів за допомогою гнучких гвинтових конвеєрів часто спостерігаються випадки їх пуску в завантаженому стані, після попередньої зупинки без вивантаження вмісту, наприклад у дозаторах чи навантажувачах зерна, піску, інших вантажів. Процеси, які виникають у цьому випадку, суттєво відрізняються від пуску гнучкого гвинтового конвеєра без сипкого матеріалу. Крім цього навантаження на робочі елементи гнучкого гвинтового конвеєра носять змінний характер, що призводить до зміни та зростання динамічних навантажень на складові частини конвеєра, які в свою чергу можуть привести до виходу його з ладу.

**Аналіз останніх досліджень.** Результати дослідження динамічних і інерційних характеристик робочих органів гвинтових конвеєрів розглянуто в роботах [1-12], в яких авторами наведено двохмасові та трьохмасові динамічні моделі як жорстких так і гнучких гвинтових конвеєрів та машин, складено диференціальні рівняння переміщення сипкого матеріалу, проведено аналіз складових елементів цих рівнянь. Також в цих роботах представлено результати розв'язку диференціальних рівнянь як аналітичними так і чисельними методами. Встановлено, що важливою складовою згаданих вище рівнянь є момент інерції робочого органу гвинтового конвеєра із транспортованим матеріалом. Проведений аналіз публікацій показав, що питанню визначення інерційних характеристик гнучкого гвинтового конвеєра приділено мало уваги, і тому розв'язки диференціальних рівнянь не достатньо точно відображають динамічні характеристики гвинтових транспортерів.

**Мета роботи.** Метою роботи є проведення теоретичних досліджень моментів інерції робочих органів із вантажем тихохідних, середньошвидкісних та швидкохідних гнучких гвинтових конвеєрів.

**Викладення основного матеріалу.** Гвинтові конвеєри за конструктивними особливостями поділяють на три групи: жорсткі із внутрішнім валом, гнучкі суцільні та гнучкі секційні, гвинтові елементи яких з'єднані між собою шарнірами. Крім цього, гвинтові конвеєри за швидкістю обертання робочого органу можна поділити на тихохідні, середньошвидкісні та швидкохідні.

В роботі будемо розглядати конструкції гнучких секційних гвинтових конвеєрів (рис 1), так як транспортування сипких матеріалів криволінійними і комбінованими трасами за

допомогою гнучких шнекових робочих органів, замкнених в еластичні кожухи, забезпечує високу мобільність при виконанні завантажувально-розвантажувальних технологічних процесів і відповідно розширює їх технологічні можливості.

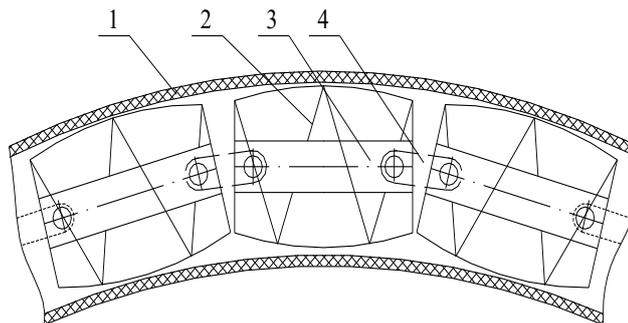


Рисунок 1 - Схема гнучкого секційного гвинтового конвеєра:  
1 – кожух; 2 – шнек; 3 – вал; 4 - шарнір

Момент інерції гвинтового робочого органа з транспортованим сипким матеріалом описуються наступними залежностями:

- для середньошвидкісного та швидкохідного гвинтових конвеєрів:

$$J_{\text{Гро}} = m_{\text{см}} \left( \frac{v_{\text{см}}}{\omega} \right)^2 + J_{\text{см}} \left( \frac{\omega_{\text{см}}}{\omega} \right)^2 + J_{\text{сро}}; \quad (1)$$

- для тихохідних гвинтових конвеєрів:

$$J_{\text{Гро}} = m_{\text{см}} \left( \frac{v_{\text{см}}}{\omega} \right)^2 + J_{\text{сро}}, \quad (2)$$

де  $m_{\text{см}}$  – маса сипкого матеріалу, який транспортується;

$v_{\text{см}}$  – осьова швидкість сипкого матеріалу, який транспортується;

$\omega$  – кутова швидкість обертання гвинтового робочого органа;

$J_{\text{см}}$  – момент інерції сипкого матеріалу, який транспортується;

$\omega_{\text{см}}$  – кутова швидкість обертання сипкого матеріалу, який транспортується;

$J_{\text{сро}}$  – момент інерції гвинтового секційного робочого органу.

Маса сипкого матеріалу, який транспортується:

$$m_{\text{см}} = \frac{\pi D_3 L \varphi \rho}{4}, \quad (3)$$

де  $D_3$  – зовнішній діаметр гвинтового робочого органу;

$L$  – довжина гвинтового робочого органу;

$\varphi$  – коефіцієнт заповнення, міжвиткового простору гвинтового робочого органу;

$\rho$  – густина матеріалу, який транспортується.

Залежно від режиму роботи гвинтового конвеєра при транспортуванні відбувається переміщення матеріалу різними траєкторіями: для тихохідного режиму (до 200 об/хв) – по лінійній траєкторії, для швидкохідного режиму (більше 700 об/хв) – по гвинтовій траєкторії, при середньошвидкісному режимі (від 200 об/хв до 700 об/хв) сипкий матеріал здійснює переміщення по складній траєкторії із частковим пересипанням в зворотному напрямку. Осьову швидкість сипкого матеріалу визначаємо за залежністю:

- для середньошвидкісного режиму роботи конвеєра:

$$v_{\text{см}} = \frac{k_{\text{см}} \omega T}{2\pi}, \quad (4)$$

- для тихохідного і швидкохідного режимів роботи конвеєра:

$$v_{\text{см}} = \frac{\omega T}{2\pi}, \quad (5)$$

де  $k_{\text{см}}$  – коефіцієнт відставання, що враховує пересипання сипкого матеріалу в зворотному напрямку;

$T$  – крок витків гвинтового робочого органу.

При усталеному переміщенні матеріалів годограф вектора швидкості частинки сипкого матеріалу є пряма лінія:

$$\frac{2\pi v_{\text{см}}}{\omega T} + \frac{2v_{\text{км}}}{\omega D_3} = 1, \quad (6)$$

де  $v_{км}$  – колова швидкість матеріалу.

Колову швидкість сипкого матеріалу знаходимо за формулою:

$$v_{км} = \frac{\omega_{см} D_3}{2}. \quad (7)$$

Підставляємо значення залежностей (4) і (7) у рівняння (6), та після перетворень одержимо залежність:

$$\frac{\omega_{см}}{\omega} = 1 - k_{см}. \quad (7)$$

Для швидкохідного режиму залежність (7) матиме вигляд:

$$\frac{\omega_{см}}{\omega} = 1. \quad (8)$$

Момент інерції сипкого матеріалу, який транспортується для швидкохідного та середньошвидкісного режимів визначається із залежності:

$$J_{см} = \frac{m_{см} r_{ісм}^2}{2}, \quad (9)$$

де  $r_{ісм}$  - радіус інерції сипкого матеріалу.

Визначаємо радіус інерції сипкого матеріалу

- для середньошвидкісного режиму аналогічно [3]:

$$r_{ісм} = \frac{D_3 k_{тсм}}{4} (1 + \sqrt{1 - \varphi}), \quad (10)$$

де  $k_{тсм}$  - коефіцієнт зміни траєкторії руху сипкого матеріалу в радіальному напрямку;

- для швидкохідного режиму [2]:

$$r_{ісм} = \frac{D_3}{4} (1 + \sqrt{1 - \varphi}). \quad (11)$$

Підставляючи значення формули (10), (11), (3) у рівняння (9), знаходимо момент інерції сипкого матеріалу:

- для середньошвидкісного режиму:

$$J_{см} = \frac{\pi D_3^4 L \varphi \rho k_{тсм}^2 (1 + \sqrt{1 - \varphi})^2}{128}. \quad (12)$$

- для швидкохідного режиму:

$$J_{см} = \frac{\pi D_3^4 L \varphi \rho (1 + \sqrt{1 - \varphi})^2}{128}. \quad (13)$$

Момент інерції гнучкого секційного робочого органу:

$$J_{срo} = \frac{m_{срo} (R_{гп}^2 - r_{гп}^2)}{2}, \quad (14)$$

де  $m_{срo}$  - загальна маса витків робочого органу;

$R_{гп}$  – зовнішній радіус гвинтової поверхні;

$r_{гп}$  - внутрішній радіус гвинтової поверхні.

Визначаємо масу витків:

$$m_{срo} = n \rho_1 h (R_{гп} - r_{гп}) \sqrt{\pi^2 (R_{гп} - r_{гп})^2 + T^2}, \quad (15)$$

де  $\rho_1$  - густина матеріалу витків гвинтової поверхні;

$n$  - загальна кількість витків гвинтової поверхні;

$h$  - товщина поперечного січення витка гвинтової поверхні.

Момент інерції жорсткого робочого органу:

$$J_{жрo} = \frac{m_{срo} (R_{гп}^2 - r_{гп}^2) + m_T (R_I^2 - r_I^2)}{2}, \quad (16)$$

де  $m_T$  - маса труби;

$R_I$  – зовнішній радіус труби;

$r_I$  - внутрішній радіус труби.

Масу труби визначаємо за формулою:

$$m_T = \pi \rho_2 L (R_1^2 - r_1^2), \quad (17)$$

де  $\rho_2$  - густина матеріалу труби.

Момент інерції гнучкого секційного робочого органа:

$$J_{\text{срo}} = \frac{k_c (m_{\text{срo}} (R_{\text{гн}}^2 - r_{\text{гн}}^2) + m_T (R_1^2 - r_1^2))}{2}, \quad (18)$$

де  $k_c$  - коефіцієнт, що враховує конструктивні особливості шарнірів.

Підставляючи значення формул (15), (17) у формулу (18), знаходимо момент інерції гнучкого секційного робочого органа:

$$J_{\text{срo}} = \frac{k_c (n \rho_1 h (R_{\text{гн}} - r_{\text{гн}}) \sqrt{\pi^2 (R_{\text{гн}} - r_{\text{гн}})^2 + T^2} (R_{\text{гн}}^2 - r_{\text{гн}}^2) + \pi \rho_2 L (R_1^2 - r_1^2)^2)}{2}, \quad (19)$$

Підставляючи відповідні складові у формули (1) і (2), знаходимо 3 варіанти для визначення моменту інерції секційного гвинтового робочого органа разом з транспортованим сипким матеріалом:

- для тихохідних гвинтових конвеєрів:

$$J_{\text{срo}} = \pi D_3^2 L \varphi \rho \frac{T^2}{16\pi^2} + \frac{k_c (n \rho_1 h (R_{\text{гн}} - r_{\text{гн}}) \sqrt{\pi^2 (R_{\text{гн}} - r_{\text{гн}})^2 + T^2} (R_{\text{гн}}^2 - r_{\text{гн}}^2) + \pi \rho_2 L (R_1^2 - r_1^2)^2)}{2}, \quad (20)$$

- для швидкохідного гвинтового конвеєра:

$$J_{\text{срo}} = \pi D_3^2 L \varphi \rho \left( \frac{T^2}{16\pi^2} + \frac{D_3^2 (1 + \sqrt{1 - \varphi})^2}{128} \right) + \frac{k_c (n \rho_1 h (R_{\text{гн}} - r_{\text{гн}}) \sqrt{\pi^2 (R_{\text{гн}} - r_{\text{гн}})^2 + T^2} (R_{\text{гн}}^2 - r_{\text{гн}}^2) + \pi \rho_2 L (R_1^2 - r_1^2)^2)}{2}, \quad (21)$$

- для середньошвидкісного гвинтового конвеєра:

$$J_2 = \pi D_3^2 L \varphi \rho \left( \frac{1}{4} \left( \frac{k_B T}{2\pi} \right)^2 + \frac{D_3^2 k_m^2 (1 + \sqrt{1 - \varphi})^2}{128} (1 - k_B)^2 \right) + \frac{k_c (n \rho_1 h (R_{\text{гн}} - r_{\text{гн}}) \sqrt{\pi^2 (R_{\text{гн}} - r_{\text{гн}})^2 + T^2} (R_{\text{гн}}^2 - r_{\text{гн}}^2) + \pi \rho_2 L (R_1^2 - r_1^2)^2)}{2}, \quad (22)$$

**Висновки.** Наведено результати теоретичних досліджень з визначення моменту інерції тихохідних, середньошвидкісних та швидкохідних гнучких гвинтових конвеєрів з секційними гвинтовими робочими органами. Також визначено вплив властивостей транспортованого сипкого матеріалу на динамічні характеристики гнучкого гвинтового конвеєра з секційними гвинтовими робочими органами. Встановлено зв'язок між конструктивними особливостями та моментами інерції гнучкого гвинтового конвеєра.

#### Інформаційні джерела

1. Булгаков В. М., Троханяк О. М. Дослідження та вдосконалення запобіжних механізмів шнекових конвеєрів. Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник. Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин. Випуск 53. 2023. С. 23-32. <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2023.53.23-31>.
2. Гевко І. Б. Гвинтові транспортно-технологічні механізми: розрахунок і конструювання. Гевко І.Б. Тернопіль: ТДТУ, 2008. 307 с.
3. Пастушенко С.І., Клендій М.Б., Троханяк О.М. Дослідження крутного моменту гвинтового конвеєра з лопатевим робочим органом. Науковий вісник таврійського державного агротехнологічного університету. 2021. вип. 11. т. 2. С. 1-11. <https://doi.org/10.31388/2220-8674-2021-2-2>.
4. Пилипака С.Ф., Клендій М.Б., Драган А.П. Моделювання та дослідження процесу транспортування сипучого матеріалу перевантажувальним патрубком гвинтового конвеєра.

Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету. 2023. вип. 13. т. 1. С. 1-16. <https://doi.org/10.31388/2220-8674-2023-1-12>.

5. Bulgakov V., Adamchuk V., Trokhaniak O., Ruzhylo Z. Experimental study of transportation of pool materials by a flexible sectional screw conveyor // Mechanization in Agriculture & Conserving Resources. 2023. Vol. 67, No. 4. P. 113-115. <https://stumejournals.com/journals/am/2023/4/113>.

6. Bulgakov V., Trokhaniak O., Holovach I., Klendii M., Adamchuk V., Ivanovs S. Investigation of the performance of a screw conveyor with a working body, made in the form of a shaft with inclined flat blades. INMATEH - Agricultural engineering. 2022. Vol. 67, No. 2. P. 406-411. <https://doi.org/10.35633/inmateh-67-41>.

7. Bulgakov, V. Trokhaniak, O. Klendii, M. Gadzalo, Ia. Harrow with screw-type operating tools: optimisation of design and process parameters. Eesti Maaulikool Estonian Universiti of Life Sciences. 2022. Agronomy Research 20(4), P. 751–763. <https://doi.org/10.15159/ar.22.055>.

8. Gupta A.K., Nott P.R. Analysis of the flow of granular materials through a screw conveyor // Архив: arXiv. 2021.

9. M. Klendii, I. Lohush, A. Drahan, I. Chvartatskiy, A. Hrabar. Justification and calculation of structural-power parameters of screw loaders. Machinery & Energetics. Journal of Rural Production Research. 2022, Vol. 13, No 4, 48-60. [https://doi.org/10.31548/machenergy.13\(4\).2022.48-59](https://doi.org/10.31548/machenergy.13(4).2022.48-59).

10. Serhii Pylypaka, Mykola Klendii. Transportation of a particle of material by the working body of an agricultural machine in the form of a vertical auger limited by a fixed coaxial cylinder. Machinery & Energetics. Journal of Rural Production Research. 2022, Vol. 13, No 3, 68-79. [https://doi.org/10.31548/machenergy.13\(4\).2022.48-59](https://doi.org/10.31548/machenergy.13(4).2022.48-59).

11. Tian Y., Yuan P., Yang F., Gu J., Chen M., Tang J., Su Y., Ding T., Zhang K., Cheng Q. Research on the principle of a new flexible screw conveyor and its power consumption // Applied Sciences. 2018. Vol. 8, No. 7. P. 1038.

12. Trokhaniak O.V. Обґрунтування раціональних параметрів шарнірно-з'єднаних робочих органів гнучкого гвинтового конвеєра // Machinery & Energetics. 2023. Vol. 14, No. 1. P. 79-88. <https://doi.org/10.31548/machinery/1.2023.79>.

<sup>1</sup>Klendiy M., <sup>1</sup>Drahan A., <sup>2</sup>Pylypets' M.

<sup>1</sup>Separated Subdivision of National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine «Berezhany agrotechnical institute»

<sup>2</sup>Ternopil Ivan Puluj National Technical University

## ON THE ISSUE OF DETERMINING THE MOMENT OF INERTIA OF A SCREW CONVEYOR WITH A SECTIONAL WORKING BODY

*The article presents the results of theoretical studies of the moment of inertia of screw conveyors with sectional working bodies for three operating modes: low-speed, medium-speed, and high-speed. Analytical dependencies have been developed to determine the moments of inertia of flexible screw conveyors, taking into account the mass of the transported bulk material, kinematic parameters, and structural features of the sectional working body. The influence of the mechanical and technological properties of bulk materials on the dynamic characteristics of flexible conveyors and the relationship between the moment of inertia and the operating mode have been established. The obtained dependencies make it possible to refine mathematical models of material motion in conveyors, which improves calculation accuracy during the design of transport and technological systems. The research results can be used in the development of new designs of flexible screw mechanisms with improved performance characteristics.*

**Keywords:** screw conveyor, sectional working body, moment of inertia, bulk material, dynamic characteristics.

Дата першого надходження  
статті до видання  
12.10.2025 р

Дата прийняття статті  
до друку  
25.11.2025 р.

Дата  
оприлюднення  
25.12.2025 р.