

ПРОЄКТУВАННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИХ СТРІЧКОВИХ КОНВЕЄРІВ

Куроп'ятник О. С. [ORCID]

Український державний університет науки і технологій, к. т. н., доцент, Україна

Анотація. Метою роботи є формування рекомендацій до проєктування енергоефективних стрічкових конвеєрів на основі використання оптимальних значень характеристик цих транспортних засобів. Проведено низку теоретичних досліджень енергоефективності таких конвеєрів на основі оцінювання впливу їх характеристик на питомі енерговитрати. Окружне зусилля приводу визначалося з використанням методу обходу за контуром. Для встановлення оптимальних значень продуктивності конвеєра та швидкості руху стрічки ширину стрічки було подано як функцію цих величин з урахуванням фізико-механічних властивостей транспортованого вантажу, особливостей конструкції роликкоопор та кута нахилу конвеєра. Як результат, для окремих вантажів отримано оптимальні значення ширини стрічки та співвідношення продуктивності конвеєра та швидкості руху стрічки, за яких питомі енерговитрати є мінімальними.

Ключові слова: стрічковий конвеєр; енергоефективність; продуктивність; ширина стрічки; оптимізація

Стрічковими конвеєрами є машини безперервної дії, основним елементом яких є прогумована вертикально замкнута стрічка, що огинає кінцеві барабани, один з яких, як правило, є приводним, інший – натяжним. Стрічкові конвеєри дуже широко застосовуються на підприємствах хімічної, металургійної, машинобудівної промисловості, у виробництві будівельних матеріалів, транспортному та промисловому будівництві, на вуглезбагачувальних фабриках. Тому задача підвищення ефективності таких машин, а також ефективності транспортних процесів з їх використанням, є актуальною.

Автори роботи [1] виділяють два способи зниження енергоспоживання на шахтному магістральному конвеєрному транспорті: встановлення додаткових рухомих або стаціонарних бункерів та використання засобів для забезпечення змінності швидкості руху конвеєрної стрічки пропорційно вхідному

вантажопотоку. Відмічається, що підвищення коефіцієнта корисної дії приводу, заміна муфт на більш сучасні, покращення пускових режимів шляхом упровадження пристроїв плавного пуску, а також застосування нових типів стрічок збільшують термін служби рухомих елементів конвеєра, але знижують споживання електроенергії незначною мірою. Більш сучасні дослідження, ґрунтовний огляд яких наведено в роботі [2], показують, що ключовими рішеннями у підвищенні енергоефективності є використання стрічок з низьким тертям, частотно-регульованих приводів, систем моніторингу та автоматизації.

Питанням підвищення енергоефективності стрічкових конвеєрів присвячено роботи [3, 4]. Методики досліджень, які використали автори, є схожими, однак робота [4] спрямована на оцінювання впливу окремих параметрів конвеєра на його енергоефективність, а в дослідженні [3] представлено результати теоретичного та емпіричного аналізу використання енергії в конвеєрах для розкривних порід та вугілля з акцентом на балансуванні взаємозв'язку між швидкістю стрічки та навантаженням. Також проводилися дослідження характеру розподілу втрат енергії під час завантаження [5]. Встановлено, що використання регулятора напруги дозволяє зменшити втрати енергії, які виникають через зміни технологічних параметрів стрічкового конвеєра. У роботі [6] проведено експериментальні дослідження по визначенню питомих енерговитрат стрічкових конвеєрів за різних значень їхніх характеристик. Їх результати отримано шляхом виконання статистичного аналізу даних про конвеєри, що використовуються на різних цементних заводах.

Аналіз літературних джерел показав, що питанням енергоефективності стрічкових конвеєрів приділено багато уваги, проте не висвітлено окремі аспекти проєктування енергоефективних конвеєрів, які базуються на використанні оптимальних значень характеристик цих транспортних засобів. Вирішенню цього питання присвячено дану роботу.

Метою роботи є формування рекомендацій до проектування енергоефективних стрічкових конвеєрів на основі використання оптимальних значень характеристик цих транспортних засобів.

Оптимальні значення характеристик стрічкових конвеєрів будемо визначати, виходячи з необхідності мінімізації питомих енерговитрат e , які відображають витрати енергії E на транспортування вантажу масою m на відстань s : $e = E/(ms)$. Витрати енергії може бути визначено за формулою $E = Fs/\eta$, де F – окружне зусилля приводу; η – коефіцієнт корисної дії приводу. Після виконання математичних перетворень отримуємо

$$e = \frac{F}{\eta m}. \quad (1)$$

Окружне зусилля приводу конвеєра з гнучким тяговим органом, в тому числі стрічкового, визначається з використанням методу обходу за контуром, відповідно до якого

$$S_{i+1} = S_i + W_{i,i+1}, \quad (2)$$

де S_i, S_{i+1} – натяги стрічки в точках i та $i+1$ тягового контуру; $W_{i,i+1}$ – опір руху стрічки на ділянці контуру між точками i та $i+1$.

Розрахунки будемо проводити для конвеєрів зі схемою, наведеною на рис. 1.

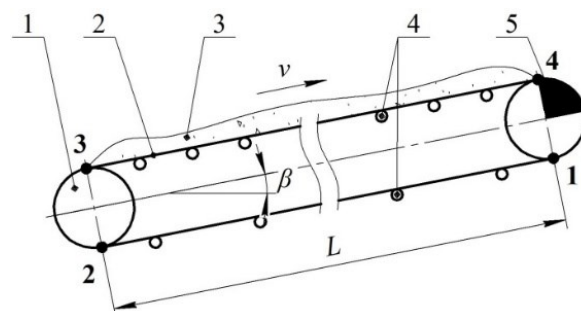


Рисунок 1 – Схема конвеєра:
1 – натяжний барабан; 2 – стрічка;
3 – транспортований вантаж;
4 – роликкоопори; 5 – приводний барабан

Відповідно до позначень, прийнятих на рис. 1, окружне зусилля приводу

$$F = S_4 - S_1, \quad (3)$$

де S_1, S_4 – натяги стрічки у точках її збігання з приводного барабана та набігання на барабан відповідно.

Можливість реалізації тяги стрічкового конвеєра забезпечується у разі дотримання умови

$$F = S_4 - S_1, \quad (4)$$

де f – коефіцієнт зчеплення стрічки з приводним барабаном; α – кут огинання стрічкою приводного барабана.

Після виконання низки математичних перетворень маємо:

$$S_1 = \frac{kW_{12} + W_{34}}{\exp(f\alpha) - k}; \quad (5)$$

$$S_4 = \frac{\exp(f\alpha)}{\exp(f\alpha) - k} (kW_{12} + W_{34}). \quad (6)$$

Тоді окружне зусилля приводу

$$F = \frac{\exp(f\alpha) - 1}{\exp(f\alpha) - k} (kW_{12} + W_{34}). \quad (7)$$

Величини опорів руху стрічки визначаємо так:

$$W_{12} = q_0 g L (w' \cos \beta - \sin \beta) + q_p'' g L w' \cos \beta; \quad (8)$$

$$W_{34} = (q + q_0) g L (w' \cos \beta + \sin \beta) + q_p' g L w' \cos \beta. \quad (9)$$

У цих формулах q – погонна маса транспортованого вантажу; q_0 – погонна маса стрічки; q_p' , q_p'' – погонні маси роlikоопор (робочої та холостої віток стрічки відповідно); L , β – довжина та кут нахилу конвеєра (див. рис. 1); w' – приведений коефіцієнт опору руху стрічки.

Поеднуючи вирази (7)–(9), отримуємо:

$$F = \frac{\exp(f\alpha) - 1}{\exp(f\alpha) - k} [kq_0 g L (w' \cos \beta - \sin \beta) + kq_p'' g L w' \cos \beta + (q + q_0) g L (w' \cos \beta + \sin \beta) + q_p' g L w' \cos \beta]. \quad (10)$$

Після підставлення (10) у (1) та виконання математичних перетворень отримуємо:

$$e = \frac{g}{\eta} \frac{\exp(f\alpha) - 1}{\exp(f\alpha) - k} \left[\left(1 + \frac{m_0}{m} + \frac{m_p}{m} \right) w' \cos \beta + \left(1 + \frac{m_0}{m} \right) \sin \beta + k \frac{m_0}{m} (w' \cos \beta - \sin \beta) \right]. \quad (11)$$

Отже, отримано залежність питомих енерговитрат від параметрів конвеєра, у якій прийнято такі позначення: $m = qL$ – маса транспортованого вантажу; $m_0 = q_0L$ – маса стрічки на одному напрямку руху (без врахування частини стрічки, що знаходиться на барабанах); $m_p = (q_p' + kq_p'')L$ – узагальнена маса роlikоопор на обох напрямках руху стрічки.

Детальний аналіз виразу (11) показав, що питомі енерговитрати залежать від таких характеристик конвеєра, як ширина стрічки B , кут нахилу конвеєра β , продуктивність Π , швидкість v та приведений коефіцієнт опору руху стрічки w' . Також певний вплив мають фізико-механічні властивості транспортованого вантажу, зокрема, коефіцієнт C продуктивності, який залежить від форми роликоопор та фізико-механічних властивостей транспортованого вантажу, та γ – насипна щільність транспортованого вантажу. Розглянемо окремі випадки сполучення цих величин для різних вантажів [7]:

- пісок – $C\gamma = 470 \cdot 1,45 \approx 680$;
- ґрунт – $C\gamma = 470 \cdot 1,6 \approx 750$;
- гравій – $C\gamma = 470 \cdot 1,8 \approx 845$;
- щебінь – $C\gamma = 550 \cdot 1,6 = 880$.

З рис. 2 видно, що функція $e(B)$ має два екстремуми, отже, існує оптимальне значення ширини стрічки B_{opt} , за якого питомі енерговитрати набувають мінімального значення. Також можна стверджувати, що використання стрічки шириною, яка відповідає першому екстремуму цієї функції, є небажаним, тому що за таких умов питомі енерговитрати є найбільшими. Характер залежності $e(B)$ для різних матеріалів є незмінним, до того ж ця функція набуває екстремальних значень за одних і тих самих значень аргументу. Отже, оптимальне значення ширини стрічки не залежить від виду транспортованого вантажу, так само й від форми роликоопор. Дослідження показали, оптимальне значення ширини стрічки, за якого питомі енерговитрати є мінімальними, залежить тільки від кута нахилу конвеєра (більшою мірою) та від коефіцієнтів, які визначають втрати енергії, зокрема, коефіцієнта опору руху стрічки. При цьому вплив коефіцієнта опору руху стрічки зростає зі збільшенням кута нахилу конвеєра. Відмічаємо, що B_{opt} не залежить від довжини конвеєра, його продуктивності та швидкості руху стрічки.

Функцію $e(\Pi)$ подано у графічному вигляді на рис. 3. Вона має два екстремуми: перший відповідає максимальним питомим енерговитратам, другий – мінімальним. Отже, існує певне оптимальне значення продуктивності Π_{opt} , за якого конвеєр є найбільш енергоефективним (питомі енерговитрати

найменші). Таке значення залежить від швидкості руху стрічки, до того ж ця залежність є лінійною.

Залежність питомих енерговитрат від співвідношення $\xi = \Pi/v$ для різних видів транспортованого вантажу подано на рис. 4. Як бачимо, функція $e(\xi)$ має два екстремуми, так само як і функція $e(B)$, але її аргументи, що відповідають екстремальним значенням, різняться для кожного з видів транспортованого вантажу. Оптимальні значення співвідношення ξ подано в табл. 1.

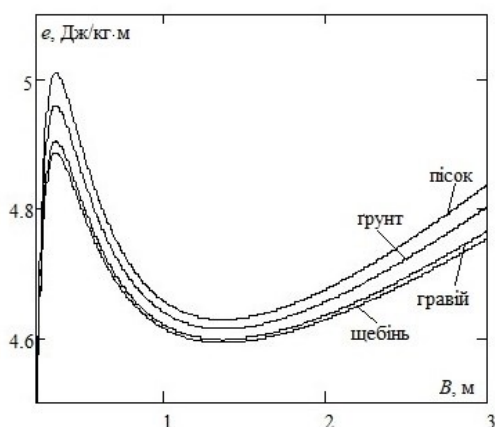


Рисунок 2 - Залежність питомих енерговитрат від ширини стрічки для різних видів транспортованого вантажу

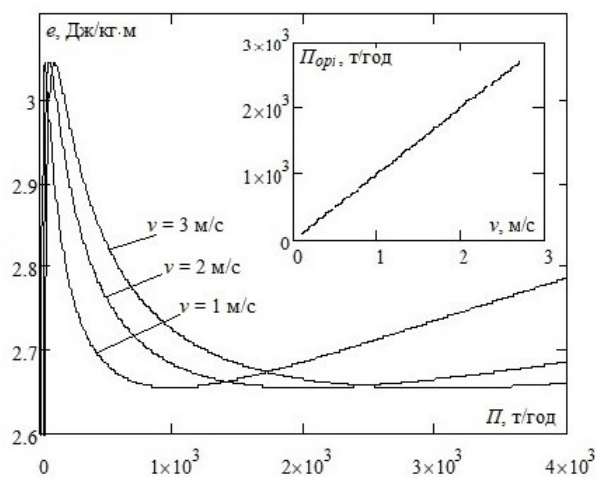


Рисунок 3 - Залежність питомих енерговитрат від продуктивності конвеєра за різних значень швидкості руху стрічки

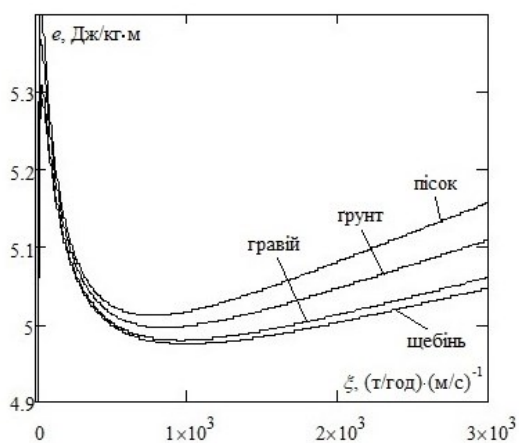


Рисунок 4 - Залежність питомих енерговитрат від співвідношення продуктивності та швидкості руху стрічки для різних видів транспортованого вантажу

Таблиця 1

Оптимальні співвідношення ξ_{opt} ,
 $(\text{т/год}) \cdot (\text{м/с})^{-1}$

Транспортований вантаж	ξ_{opt}
Пісок	770
Ґрунт	850
Гравій	958
Щебінь	998

Висновки

Проектування енергоефективних стрічкових конвеєрів вимагає врахування оптимальних значень їхніх характеристик, зокрема, ширини стрічки, продуктивності та швидкості, за яких питомі енерговитрати стають мінімальними. Доцільність вибору інших значень повинно мати достатнє техніко-економічне обґрунтування. Разом із тим слід враховувати, що чисельні значення величин, наведені в цій роботі, отримано для певних сполучень характеристики транспортованих вантажів і можуть відрізнятися за інших умов використання конвеєрів.

ЛІТЕРАТУРА

1. Разумний Ю. Т., Прокуда В. М. Енергоефективність магістрального конвеєрного транспорту вугільних шахт : монографія. Дніпро : НГУ, 2018. 120 с.
2. Konieczna-Fuławka M. Energy-saving solutions applied in belt conveyors: a literature review. *Energies*. 2025. Vol. 18. 3019. doi: 10.3390/en18123019
3. Jurdziak L., Bajda M. Balancing load and speed: a new approach to reducing energy use in coal conveyor systems. *Energies*. 2025. Vol. 18. 4716. doi: 10.3390/en18174716
4. Kulinowski P. Directions for reducing the energy consumption of mining belt conveyors. *Mining – Informatics, Automation and Electrical Engineering*. 2022. № 3 (551). P. 21–34. doi: 10.7494/miag.2022.3.551.21
5. Печеник М. В., Бур'ян С. О., Казьміна Л. М. Дослідження характеру розподілу втрат під час завантаження конвеєра. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2018. № 2. С. 63–67. URL: <https://visnyk.vntu.edu.ua/index.php/visnyk/article/view/2215/2160> (дата звернення: 01.04.26).
6. Jena M. Ch., Mishra S. K., Moharana H. S. Experimental investigation on maximizing conveying efficiency of belt conveyors used in series application and estimation of power consumption through statistical analysis. *Environmental Progress & Sustainable Energy*. 2022. Vol. 42 (3). 14031. doi: 10.1002/ep.14031
7. Bohomaz V. M. Research of dependence of belt conveyer drive power on its design parameters. *Science and Transport Progress. Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport*. 2016. № 1. P. 131–146. doi: 10.15802/stp2016/61024

DESIGN OF ENERGY EFFICIENT BELT CONVEYORS

Oleksii Kuropiatnyk

Abstract. *The aim of the work is to formulate recommendations for the design of energy-efficient belt conveyors based on the use of optimal values of the characteristics of these transport vehicles. A number of theoretical studies of the energy efficiency of such conveyors were conducted based on the assessment of the influence of their*

characteristics on specific energy consumption. The drive force was determined using the contour bypass method. To establish optimal values of the conveyor productivity and belt speed, the belt width was given as a function of these values, taking into account the physical and mechanical properties of the transported cargo, the design features of the roller supports and the angle of inclination of the conveyor. As a result, for individual cargoes, optimal values of the belt width and the ratio of conveyor productivity and belt speed were obtained, at which the specific energy consumption is minimal.

Keywords: belt conveyor; energy efficiency; productivity; belt width; optimization

REFERENCES

1. Razumnyi Yu. T., Prokuda V. M. Enerhoefektyvnist mahistralnoho konveiernoho transportu vuhilnykh shakht : monohrafiia. Dnipro : NHU, 2018. 120 p. [in Ukrainian]
2. Konieczna-Fuławka M. Energy-saving solutions applied in belt conveyors: a literature review. *Energies*. 2025. Vol. 18. 3019. doi: 10.3390/en18123019.
3. Jurdziak L., Bajda M. Balancing load and speed: a new approach to reducing energy use in coal conveyor systems. *Energies*. 2025. Vol. 18. 4716. doi: 10.3390/en18174716.
4. Kulinowski P. Directions for reducing the energy consumption of mining belt conveyors. *Mining – Informatics, Automation and Electrical Engineering*. 2022. № 3 (551). P. 21–34. doi: 10.7494/miag.2022.3.551.21.
5. Pechenyk M. V., Burian S. O., Kazmina L. M. Doslidzhennia kharakteru rozpodilu vtrat pid chas zavantazhennia konveiera. *Visnyk Vinnytskoho politekhnichnoho instytutu*. 2018. № 2. P. 63–67. [in Ukrainian]
6. Jena M. Ch., Mishra S. K., Moharana H. S. Experimental investigation on maximizing conveying efficiency of belt conveyors used in series application and estimation of power consumption through statistical analysis. *Environmental Progress & Sustainable Energy*. 2022. Vol. 42 (3). 14031. doi: 10.1002/ep.14031.
7. Bohomaz V. M. Research of dependence of belt conveyer drive power on its design parameters. *Science and Transport Progress. Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport*. 2016. № 1. P. 131–146. doi: 10.15802/stp2016/61024