

Д-р техн. наук Є. В. Семененко, канд. техн. наук П. В. Семененко

ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ВЕРТИКАЛЬНОГО ШНЕКА ДЛЯ ТРАНСПОРТУВАННЯ МІСЯЧНОГО РЕГОЛІТУ

Мета статті полягає в розробленні науково обґрунтованого методу визначення основних технічних показників вертикального шнекового транспорту, таких як продуктивність і потужність електродвигуна, що її забезпечує, які залежать від густини та пористості транспортованого матеріалу, геометричних характеристик шнека й особливостей гравітаційних полів у місці транспортування, та в дослідженні можливих обмежень його параметрів під час транспортування місячного реголіту. Для досягнення мети було використано вже відомі залежності для розрахування параметрів шнека-транспортера та фундаментальні закономірності механіки сипкого середовища, основні рівняння електродинаміки асинхронних двигунів, а також особливості поведінки сипких середовищ під час переміщення вертикальним шнеком, що експериментально дослідили автори. Це дало змогу вперше для умов Місяця запропонувати методику розрахування технічних показників шнека-транспортера за відомими геометричними характеристиками шнека, ступенем його наповненості та параметрами обраного електродвигуна. Вдалося дослідити вплив на основні параметри вертикального шнека-транспортера ступеня його наповненості та встановити можливі обмеження геометричних параметрів, які зумовлені властивостями й особливостями використовуваного електродвигуна. Визначено допустимі значення відстані транспортування, діаметра шнека-транспортера та інших його геометричних параметрів, а також ступеня наповненості шнека, які можливі за параметрів обраного електродвигуна. Обґрунтовано, що найбільш перспективними для використання в умовах Місяця для транспортування розсипу місячного реголіту будуть технологічні рішення на основі вертикального шнекового транспорту, оскільки шнеки малогабаритні та гнучкі, можуть розміщатися в трубах і розташовуватися нижче рівня поверхні Місяця, забезпечують безперебійний процес транспортування, можуть автономно використовуватися, живитися від сонячних батарей.

Ключові слова: Місяць, реголіт, шнек, електродвигун, витрата, потужність.

This paper aims to develop a scientifically grounded method for determining the key technical parameters of a vertical screw conveyor—specifically, throughput and the power requirement of the driving electric motor. These parameters depend on the density and porosity of the transported material, the screw's geometric characteristics, and the gravitational field at the transportation site. The study also explores potential design constraints when handling lunar regolith.

To achieve this objective, the authors applied established equations for screw conveyor parameter calculations, fundamental principles of bulk material mechanics, key electrodynamic equations for asynchronous motors, and specific behavioral characteristics of bulk materials during vertical screw transport, which were also investigated experimentally.

As a result, a novel method is proposed for calculating the technical specifications of a screw conveyor under lunar conditions, based on known geometric parameters, filling ratio, and electric motor characteristics. The study further examines the influence of the conveyor's filling ratio on performance and identifies geometric limitations imposed by the operational boundaries of the selected motor. Acceptable values for transport height, screw diameter, other geometric parameters, and achievable filling ratios for a given motor are determined.

The study substantiates that vertical screw conveyors are the most promising solution for lunar regolith transport. These systems are compact, adaptable, capable of integration within tubes or underground installations, operate continuously, function autonomously, and can be powered by solar energy.

Keywords: Moon, regolith, screw conveyor, electric motor, throughput, power.

Вступ

З початку XXI сторіччя видобуток корисних копалин в умовах Місяця більшість фахівців вважає перспективою найближчих років [1–5]. Уже сформульовано техніко-технологічні вимоги до обладнання, здатного забезпечити доставляння потрібних

технологічних пристроїв і персоналу для їх обслуговування на Місяць та повернення їх на Землю [6–12]. Оскільки стали відомими геологічні умови видобутку можливих видів корисних копалин, попередньо оцінено потужність їх покладів і геологічні особливості розташування родовищ на поверхні Місяця [13], нагальним питанням є створення

пристроїв і засобів, що використовуватимуть в автономних технологіях видобування, транспортування та можливого перероблення цих копалин на поверхні єдиного природного супутника нашої планети. Значна кількість наукових колективів вважає перспективним використання для умов Місяця малогабаритних, безперервних видів транспорту з електричним живленням від сонячних панелей [8, 11, 12]. Найперспективнішим вважають багатосекційний шнек, який розміщено в трубопроводі. Таке поєднання надає чимало переваг, але потребує адаптації методів розрахування параметрів такого пристрою до умов Місяця. Більшість фахівців, що працюють над вирішенням проблем освоєння Місяця, розглядають горизонтальний шнековий транспортер (рис. 1) [8, 11, 12].

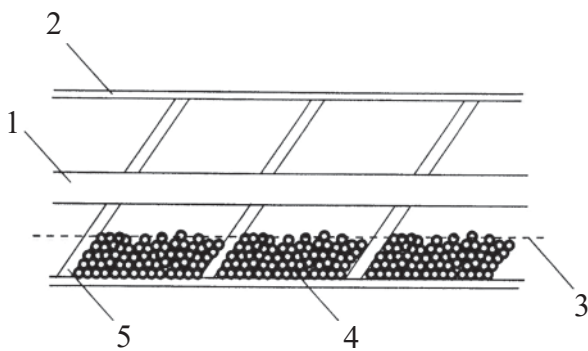


Рис. 1. Принципова схема горизонтального шнекового транспортера [12]:

1 – вал шнека; 2 – корпус-труба шнекового транспортера; 3 – узагальнена максимальна висота шару реголіту; 4 – шар реголіту між лопатями шнека; 5 – лопаті шнека

Це зумовлено спрямованістю на видобуток реголіту з поверхні Місяця. Тобто розглядають ідеальні умови для родовища. Утім, існує декілька факторів, які свідчать про необхідність розглянути більш складні гірничо-геологічні умови видобування реголіту. По-перше, після видобутку верхнього шару реголіту виникне необхідність розроблення більш глибоких пластів, що потребуватиме застосування похилих шнекових транспортерів. По-друге, може виникнути необхідність розроблення покладів, які знаходяться не на рівнинній поверхні, а в кратерах або в глибоких западинах, або шахтах. По-третє, дози сонячної радіації

ускладнюють видобувні роботи. Як свідчать розрахунки, для захисту від її дії потрібно спуститися на 5–7 м нижче рівня поверхні Місяця. Тобто використання вертикальних шнекових транспортерів є актуальним питанням для майбутніх технологій розроблення родовищ в умовах Місяця.

Отже, для дослідження можливості використання вертикального шнекового транспорту для місячного реголіту необхідно розробити методи визначення його основних технічних показників, таких як продуктивність і потужність електродвигуна, що її забезпечує, які залежать від параметрів матеріалу, геометричних характеристик шнека й особливостей гравітаційних полів, а також дослідити обмеження, які накладають ці параметри на довжину транспортера. Це й становить мету нашого дослідження.

Особливості конструкції та методів розрахування параметрів шнека

Прототипом шнекового транспортера є архімедів гвинт. Цей пристрій теж складається з корпусу-труби, в якому розміщено вал із неперервною гвинтовою стрічкою, що утворює неперервний виступ на його поверхні [14–19]. Під час розрахування параметрів і режимів роботи шнека таку поверхню моделюють окремі лопаті, між якими розміщено сипкий матеріал, але на відміну від горизонтального шнека (рис. 1) [12], у якому існує асиметрія в розподілі твердих частинок по площині поперечного перерізу, у випадку вертикального шнека, як свідчать візуальні спостереження, транспортований матеріал рівномірно розподіляється по всій площі (рис. 2), а товщину шару сипкого матеріалу, розміщеного між лопатями шнека, можна визначити за формулою

$$h = kb, \quad (1)$$

де h – товщина шару транспортованого матеріалу, м; k – емпіричний коефіцієнт, що не перевищує одиниці; b – крок шнека, м.

Під час транспортування вертикальним шнеком сипкий матеріал, розміщений між лопатями, утримується від спадання вниз силою тертя. Саме за рахунок цієї сили шнек і підіймає сипкий матеріал, тобто саме сила тертя й обумовлюватиме потужність елек-

тричного двигуна, який необхідно використувати.

Можливість використання вертикального шнека для транспортування сипкого матеріалу залежить від кута між його лопатями й валом. Для того щоб матеріал долучався до вертикального руху, тангенс цього кута не повинен перевищувати узагальненого коефіцієнта тертя транспортованого матеріалу о поверхню лопаті шнека:

$$\operatorname{tg} \varphi < f, \quad (2)$$

де φ – кут між лопаттю шнека та віссю її обертання, рад; f – узагальнений коефіцієнт тертя транспортованого матеріалу о лопаті шнека.

Ураховуючи геометричну структуру шнека та співвідношення його параметрів, нерівність (2) можна записати як обмеження на розміри шнека

$$\frac{b}{4R} < f, \quad (3)$$

де R – радіус лопаті шнека, м.

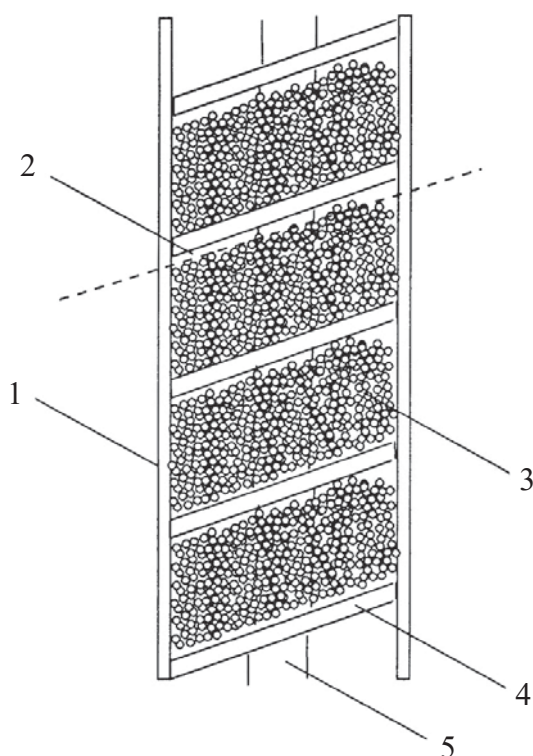


Рис. 2. Принципова схема вертикального шнекового транспортера:

- 1 – корпус-труба шнекового транспортера;
- 2 – узагальнена максимальна висота шару реголіту;
- 3 – шар реголіту між лопатями шнека;
- 4 – лопаті шнека; 5 – вал шнека

Визначення моменту на валу шнека

Отже, якщо розглянути схему сил, що діють між лопаттю шнека та шаром сипкого матеріалу (рис. 3), то можна визначити елементарну силу, яка створюватиме момент на валу електродвигуна, за формулою

$$dF = f k_g b (1 - m) \rho_s g \cos^2 \varphi dr,$$

де k_g – коефіцієнт змінення прискорення вільного падіння в умовах Місяця у порівнянні із земними умовами, 0,1655; m – пористість шару транспортованого матеріалу, змінюється від 0,42 до 0,54 д. од.; ρ_s – густина транспортованого матеріалу змінюється від 1300 до 2000 кг/м³; g – прискорення вільного падіння в земних умовах, м/с²; dr – довжина ділянки вздовж радіуса, на якій діє елементарна сила, м.

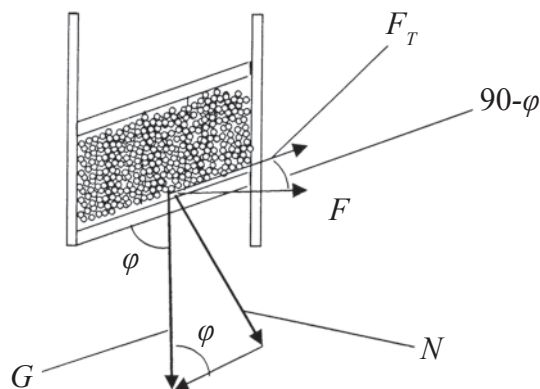


Рис. 3. Принципова схема сил, що діють між лопаттю шнека та шаром сипкого матеріалу: G – сила ваги шару сипкого матеріалу; F_T – сила тертя; F – сила, що утворює момент обертання; N – сила реакції лопаті шнека

Ця елементарна сила, шляхом інтегрування по радіусу (рис. 4), дає змогу визначити елементарний момент

$$M_0 = f b k_g (1 - m) \rho_s g \frac{\sin^2 \varphi}{4} (R^2 - R_0^2), \quad (4)$$

де M_0 – момент на валу шнека-транспортера, що витрачається на подолання сили тертя транспортованого матеріалу о поверхню його лопатей, Н·м; R_0 – радіус вала шнека, м.

Щоб обчислити повний момент на валу шнека, необхідно величину, розраховану за

формулою (4), помножити на довжину середньої лінії його гвинтового каналу

$$S = L \sqrt{1 + \left(2\pi \frac{R + R_0}{b} \right)^2},$$

де S – довжина середньої лінії гвинтового каналу шнека-транспортера, м; L – довжина шнека-транспортера, м.

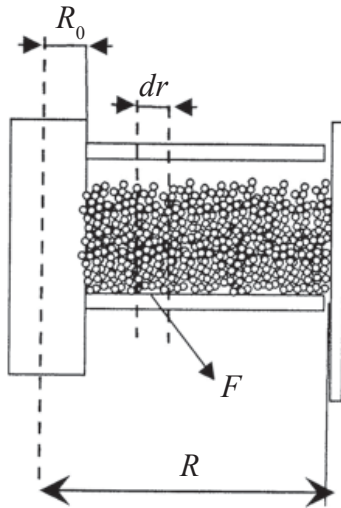


Рис. 4. Схема визначення елементарного моменту на осі шнека

Якщо виконуються умови реалізації режиму руху, тобто нерівності (2) та (3) є правильними, то момент на валу шнека-транспортера, який витрачається на подолання сили тертя транспортованого матеріалу о поверхню лопатей, з урахуванням (1) та (4), обчислимо за формулами

$$M = f k k_g \psi_0 L g (1 - m) \rho_s R^3; \quad (5)$$

$$\psi_0 = \sigma^3 \frac{1 - \kappa^2}{1 + \sigma^2} \sqrt{1 + \left(\frac{\pi}{2} \frac{1 + \kappa}{\sigma} \right)^2};$$

$$\kappa = \frac{R_0}{R}; \quad \sigma = \frac{b}{4R},$$

де M – момент на валу шнека-транспортера, який витрачається на подолання сили тертя транспортованого матеріалу, Н·м; ψ_0 – конструктивний параметр шнека (рис. 5); σ – геометричний параметр шнека; κ – коефіцієнт вала.

На відміну від горизонтального шнека-транспортера, який переміщує матеріал із

заданою продуктивністю без зміни його висоти, вертикальний шнек забезпечує піднімання цього об'єму на висоту, що дорівнює довжині шнека.

Таким чином, потужність електричного двигуна буде визначено за формулою

$$P = M \omega + Q L; \quad (6)$$

$$Q = \frac{\pi}{4} k (R^2 - R_0^2) b \omega, \quad (7)$$

де P – потужність електричного двигуна, Вт; ω – частота обертання вала шнека, с⁻¹; Q – витрата транспортованого матеріалу, м³/с.

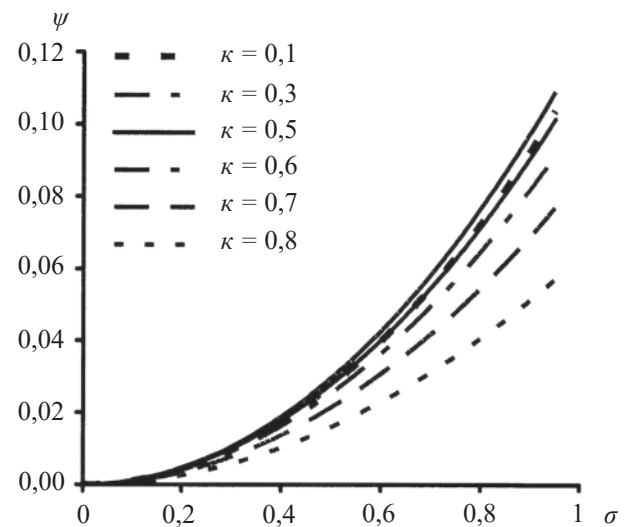


Рис. 5. Залежність конструктивного параметра шнека від його геометричного параметра для різних значень коефіцієнта вала

Підставивши до формули (6) формули (5) і (7), після певних перетворень отримаємо

$$M_E = \psi K \rho_s g L R^3; \quad (8)$$

$$\psi = \pi (1 - \kappa^2) \sigma + f \sigma^3 \frac{1 - \kappa^2}{1 + \sigma^2} \sqrt{1 + \left(\frac{\pi}{2} \frac{1 + \kappa}{\sigma} \right)^2};$$

$$K = k k_g (1 - m),$$

де M_E – момент на валу шнека-транспортера, який витрачається на подолання сили тертя транспортованого матеріалу, Н·м; K – коефіцієнт умов застосування; ψ – конструктивний коефіцієнт потужності (рис. 6).

Отже, для визначення основних технічних показників шнека, таких як продуктивність і потужність електродвигуна, що її забезпечує, необхідно визначити, який момент потрібно прикласти до вала з боку електричного двигуна.

Визначення технологічних показників

Для використання в умовах Місяця фахівці розглядають різні типи двигунів, але оскільки найбільш доступним видом енергії є електрична енергія, а найбільш малогабаритними є електричні асинхронні двигуни з коротко замкнутим ротором, то доцільним видається їх використання [20]. Відомі проекти використання такого типу електродвигунів для горизонтальних шнеків-транспортів [8, 11, 12]. У випадку вертикального шнека-транспортера для цього типу електродвигунів момент на валу обумовлюється частотою обертання ротора, що визначають розв'язанням такого рівняння [12, 20]:

$$\psi K \rho_s g L R^3 = \frac{2M_m(1+s_k)s_k}{(s^2 + s_k s + s_k^2)} s; \quad (9)$$

$$s = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0}; \quad s_k = \frac{R_2}{x_2}; \quad M_m = \frac{3U^2}{2(x_c + x_p)},$$

де M_m – максимально можливий момент електричного двигуна, Н·м; s_k – критичне ковзання електричного двигуна; s – ковзання електричного двигуна; ω_0 – частота обертання електромагнітного поля, с^{-1} ; R_2 – наведений активний опір ротора, Ом; x_2 – реактивний опір ротора, Ом; U – фазна напруга обмотки статора, В; x_c – активний опір статора електродвигуна, Ом; x_p – активний опір ротора електродвигуна, Ом.

Рівняння (9) для випадку вертикального шнека збігається з аналогічним рівнянням для розрахування параметрів горизонтального шнека [12], що дає нам змогу використати його відомий розв'язок і запропонувати таку формулу для розрахування частоти обертання шнека (рис. 7):

$$\omega = \Gamma \omega_0; \quad (10)$$

$$\Gamma = \left(1 + \frac{s_k}{2}\right) \left[1 - \frac{s_k}{2 + s_k} \left(\mu + \sqrt{\mu^2 - 2\mu - 3}\right)\right];$$

$$\mu = \frac{2M_m(1+s_k)}{\psi K \rho_s g L R^3},$$

де Γ – коефіцієнт ковзання (рис. 7); μ – електрично-механічний параметр.

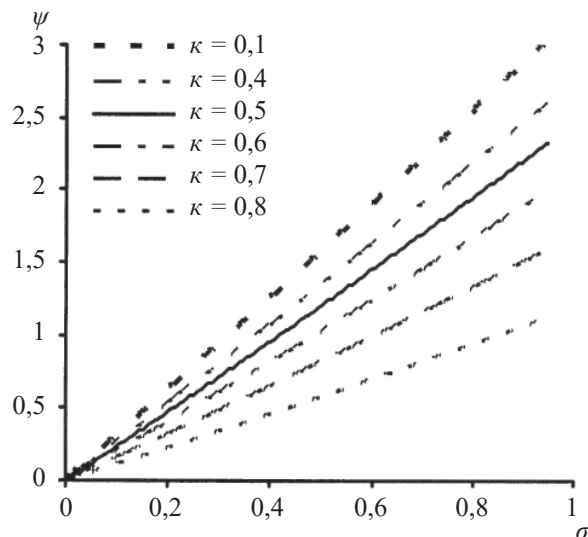


Рис. 6. Залежність конструктивного коефіцієнта потужності від геометричного параметра шнека за різних значень коефіцієнта вала

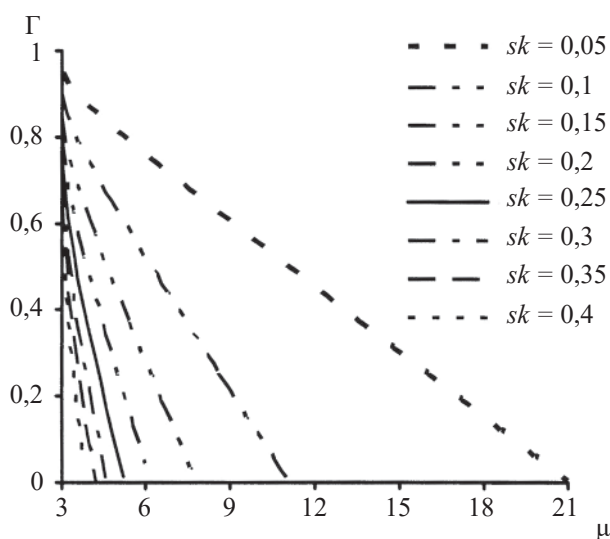


Рис. 7. Залежність коефіцієнта ковзання від електрично-механічного параметра за різних значень критичного ковзання електричного двигуна

Розглянувши разом формули (6)–(10), отримуємо такі залежності для обчислення потужності двигуна та витрати матеріалу:

$$P = \psi K \Gamma \omega_0 \rho_s g L R^3; \quad (11)$$

$$Q = \pi k (1 - \kappa^2) \Gamma \sigma \omega_0 R^3. \quad (12)$$

Формули (11) і (12) дають змогу розрахувати технічні показники вертикального шнека-транспортера за відомими його геометричними характеристиками, ступенем наповненості шнека та параметрами обраного електродвигуна.

Обмеження технологічних показників

Утім, формули (11) і (12) дають змогу розрахувати не тільки технічні показники вертикального шнека-транспортера, а й допустимі умови використання шнека-транспортера. За їх допомогою можна визначити відстань транспортування, діаметр шнека та інші його геометричні параметри, а також ступінь наповненості шнека, можливі за параметрів обраного електродвигуна.

Так, якщо електродвигун уже обрано, то потужність його відома і обмежена нерівністю

$$P \leq [P], \quad (13)$$

де $[P]$ – допустиме значення потужності електродвигуна, Вт.

Розглянувши разом формули (10)–(13), отримаємо таке обмеження:

$$\left(1 + \frac{s_k}{2}\right) \left[1 - \frac{s_k}{2 + s_k} \left(\mu + \sqrt{\mu^2 - 2\mu - 3}\right)\right] \leq \nu \mu;$$

$$\nu = \frac{[P]}{2M_m(1 + s_k)\omega_0},$$

яке після відповідних перетворень можна записати як систему обмежень для безрозмірного комплексу параметрів (рис. 8, 9)

$$B \leq \frac{K \rho_s g \psi L R^3}{2M_m(1 + s_k)} \leq A; \quad (14)$$

$$B = \frac{c}{1 + \sqrt{1 - \frac{1}{zc}}}; \quad A = \frac{c}{1 - \sqrt{1 - \frac{1}{zc}}};$$

$$z = \frac{2\nu + \nu s_k + s_k}{2 + s_k + 2s_k^2}; \quad c = \frac{2\nu + \nu s_k + s_k}{2\nu(\nu + s_k)},$$

де B – нижня межа інтервалу змінення безрозмірного комплексу параметрів вертикального шнека (рис. 8); A – верхня межа

інтервалу змінення безрозмірного комплексу параметрів вертикального шнека (рис. 9); c – коефіцієнт меж інтервалу змінення безрозмірного комплексу параметрів вертикального шнека; z – параметр меж інтервалу змінення безрозмірного комплексу параметрів вертикального шнека; ν – відносна допустима потужність.

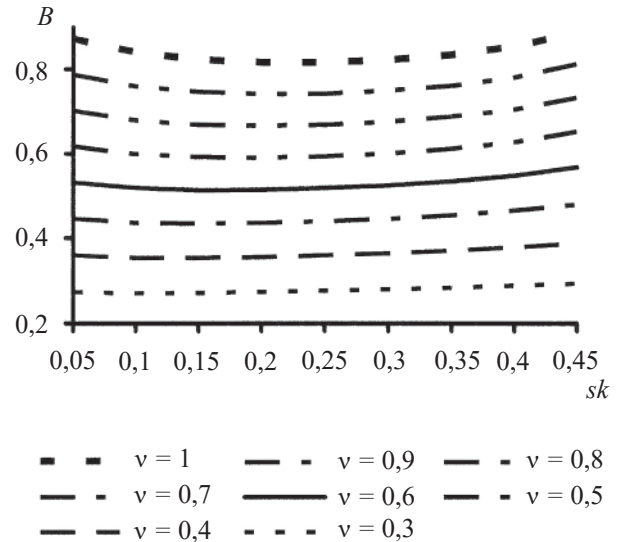


Рис. 8. Залежність нижньої межі діапазону змінення безрозмірного комплексу параметрів шнека від критичного ковзання електричного двигуна за різних значень відносної допустимої потужності

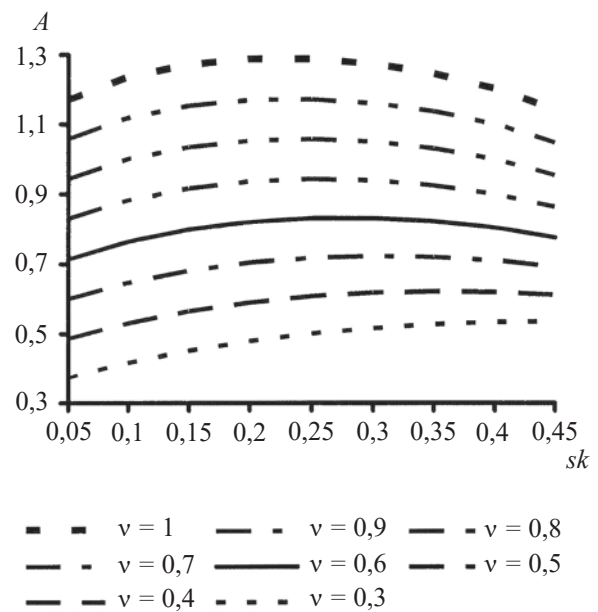


Рис. 9. Залежність верхньої межі діапазону змінення безрозмірного комплексу параметрів шнека від критичного ковзання електричного двигуна за різних значень відносної допустимої потужності

Обмеження (14) дають змогу вирахувати залежність діапазону змінення безрозмірного комплексу параметрів шнека від основних характеристик двигуна й технологічних вимог (рис. 10)

$$\Delta = \frac{1}{2} z \sqrt{1 - \frac{1}{zc}}, \quad (15)$$

де Δ – діапазон змінення безрозмірного комплексу параметрів шнека (рис. 10).

З рис. 10 видно, що залежність діапазону змінення безрозмірного комплексу параметрів шнека від критичного ковзання електричного двигуна має екстремум, а саме максимум, який змінюється залежно від значення відносної допустимої потужності (див. таблицю).

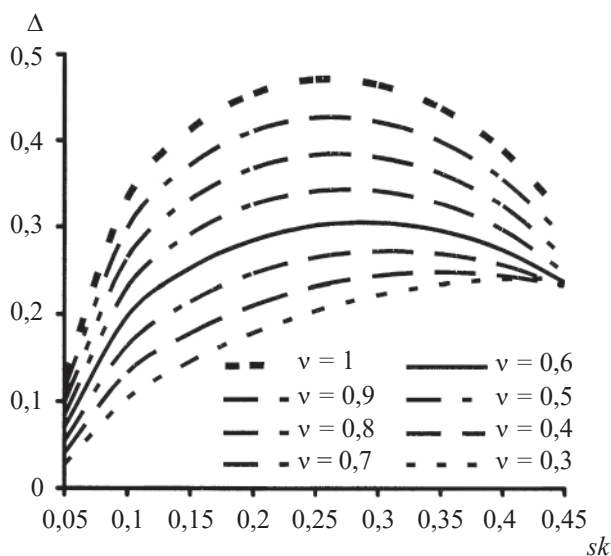


Рис. 10. Залежність діапазону змінення безрозмірного комплексу параметрів шнека від критичного ковзання електричного двигуна за різних значень відносної допустимої потужності

Параметри екстремуму залежності [18]

v	s_k	Δ
1	0,471	0,427
0,9	0,384	0,427
0,8	0,465	0,342
0,7	0,465	0,305
0,6	0,465	0,272
0,5	0,438	0,248
0,4	0,314	0,241
0,3	0,314	0,254
0,2	0,314	0,272

Отже, обмеження (14) стосовно формул (11)–(13) є критерієм безпечної експлуатації шнека й обумовлює визначення допустимих значень відстані транспортування, діаметра шнека та інших його геометричних параметрів, а також ступеня наповненості шнека, які можливі за параметрів обраного електродвигуна.

Висновки

1. Таким чином, формули (1)–(15) дають змогу визначити та дослідити можливості використання вертикального шнекового транспорту для місячного реголіту.

2. На основі залежностей (1)–(15) вперше для вертикальних шнеків-транспортів запропоновано метод визначення основних технічних показників, таких як продуктивність і потужність електродвигуна, що її забезпечує, які залежать від параметрів матеріалу, геометричних характеристик шнека й особливостей гравітаційних полів.

3. Для отриманих закономірностей встановлено й обґрунтовано обмеження, які накладають геометричні, геологічні й технічні параметри на довжину транспортера та характеристики асинхронного електричного двигуна.

4. Сумісний розгляд обмежень та отриманих формул дає змогу визначити допустимі значення довжини вертикального шнека-транспортера, його діаметра та інших геометричних параметрів, а також ступеня наповненості шнека, можливих за параметрів обраного електродвигуна.

5. Запропоновані залежності створюють наукові основи для розроблення технологій видобування і транспортування реголіту в умовах Місяця та інших планет Сонячної системи.

Список використаної літератури

1. Семененко Е. В., Осадчая Н. В. Традиционные и нетрадиционные виды энергии, а также космические полезные ископаемые в околоземном пространстве. Научно-практическая конференция «Современные расчетно-экспериментальные методы определения характеристик ракетно-космической

техники». м. Дніпро, 10–12 грудня 2019 р. С. 62 – 63.

2. Jolliff B. L., Wiczorek M. A., Shearer C. K., Neal C. R. New Views of the Moon. Reviews in mineralogy and geochemistry. 2006. Vol. 60. 721 p. DOI: 10.2138/rmg.2006.60.

3. Robert E. Grimm. Geophysical constraints on the lunar Procellarum KREEP Terrane. Journal of Geophysical Research: Planets. 2013. Vol. 118, Issue 4. P. 768–778. URL: [https://agupubs-onlinelibrary-wiley-com.translate.goog/doi/10.1029/2012JE004114?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=ru&_x_tr_hl=ru&_x_tr_pto=sc](https://agupubs.onlinelibrary-wiley-com.translate.goog/doi/10.1029/2012JE004114?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=ru&_x_tr_hl=ru&_x_tr_pto=sc) <https://doi.org/10.1029/2012JE004114>.

4. Moon Village Association. URL: <https://moon-villageassociation.org/about/>.

5. GLOBAL MOON VILLAGE. URL: <https://space-architect.org/portfolio-item/global-moon-village>.

6. Пустовгаров А. А., Осіновий Г. Г. Концепція шлюзового модуля місячної бази. XXV Міжнародна молодіжна науково-практична конференція «Людина і космос». Збірник тез, НЦАОМ, Дніпро, 2023. С. 86–87.

7. Бердник А. И., Каляпин М. Д., Лысенко Ю. А., Бугаенко Т. К. Многоцветный лунный лендер. Космическая наука и технология. 2019. Т. 25. № 5. С. 3–10.

8. Семененко П. В., Грошелев Д. Г., Осіновий Г. Г., Семененко Е. В., Осадчая Н. В. Способы транспортировки полезных ископаемых от места их добычи к месту переработки в лунных условиях. XVII конференция молодых ученых «Геотехнические проблемы разведки родовищ». м. Дніпро, 24 жовтня 2019 р. С. 7.

9. Komatsu побудує экскаватор для роботи на Місяці. URL: <https://www.autocentre.ua/ua/news/concept/komatsu-postroit-eks-kavator-dlya-raboty-na-lune-1380272.html>.

10. Help NASA Design a Robot to Dig on the Moon. URL: <https://www.nasa.gov/directorates/stmd/help-nasa-design-a-robot-to-dig-on-the-moon/>.

11. Семененко Є. В., Семененко П. В., Грошелев Д. Г. Технологічні параметри шнека для транспортування місячного реголіту. Збірка тез XXVI Міжнародної молодіжної науково-практичної конференції «Людина і космос», Дніпро, 17–19 квітня, 2024. С. 132–133.

12. Семененко Є. В., Біляєв М. М., Семененко П. В. Розрахунок параметрів системи

транспортування місячного реголіту. Space Technology. Missile Armaments. 36. наук.-техн. ст. 2024. Вип. 1. Дніпро: ДП «КБ «Південне». С. 93 – 101.

13. Bezruchko K. A. Review of potential sources for obtaining energy carriers and mineral raw materials in outer space. Геотехнічна механіка. 2022. № 163. С. 140–154. <https://doi.org/10.15407/geotm2022.163.140>.

14. Nouman Khan, Muhammad Kaleem Sarwar, Muhammad Rashid, Hafiz Kamran Jalil Abbasi, Saif Haider, Muhammad Atiq Ur Rehman Tariq, Abdullah Nadeem, Muhammad Ahmad Zulfiqar, Ali Salem, Nadhir Al-Ansari, Abdelaziz M. Okasha, Ahmed Z. Dewidar & Mohamed A. Mattar. Development of a sustainable portable Archimedes screw turbine for hydropower generation. Scientific Reports. 2025. Vol. 15. Issue 1. DOI: 10.1038/s41598-025-90634-8.

15. Kumar Thakur N., Thakur R., Kashyap K., Goel B. Efficiency enhancement in Archimedes screw turbine by varying different input parameters - An experimental study. Materials Today: Proceedings. 2022. Vol. 52, Part 3. P. 1161–1167.

16. Kozyn A., Lubitz W. D. A power loss model for Archimedes screw generators. Renewable Energy. 2017, Vol. 108. P. 260–273.

17. Куликівський В. Л., Палійчук В. К., Боровський В. М. Дослідження травмування зерна гвинтовим конвеєром. Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин. 2016. Вип. 46. С. 160–165.

18. Любін М. В., Токарчук О. А., Яропуд В. М. Особливості роботи крутопохилених гвинтових транспортерів при переміщенні зернової продукції. Техніка, енергетика, транспорт АПК. 216. № 3 (95). С. 235–240.

19. Булгаков Б. М., Адамчук В. В., Надикто В. Т., Троханяк О. М. Теоретичне обґрунтування параметрів гнучкого гвинтового конвеєра для транспортування зернових матеріалів. Вісник аграрної науки. 2023. № 4 (841). С. 59 – 66.

20. Семененко Е. В. Научные основы технологий гидромеханизации открытой разработки титан-цирконовых россыпей. Киев: Наукова думка, 2011. 232 с.