

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

РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ СИСТЕМИ ТРАНСПОРТУВАННЯ МІСЯЧНОГО РЕГОЛІТУ

Мета статті полягає в розробленні науково обґрунтованого методу визначення основних технологічних показників шнекового транспорту, таких як витрата матеріалу та потужність відповідного електродвигуна, за густиною та пористістю матеріалу, який транспортується, геометричними характеристиками шнека й особливостями гравітаційних полів у місці транспортування, а також у дослідженні можливих обмежень параметрів шнека під час транспортування місячного реголіту. Для досягнення мети були використані 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 шнеком, що були експериментально досліджені вітчизняними авторами. Це дозволило вперше для умов Місяця запропонувати методику розрахування технологічних показників шнека-транспортера, таких як витрата матеріалу та потужність відповідного електродвигуна, за відомими геометричними характеристиками магістралі та трубопроводу, ступенем наповненості шнека та параметрами обраного електродвигуна. Вдалося дослідити вплив ступеня наповненості шнека-транспортера на його основні характеристики та встановити можливі обмеження геометричних параметрів та ступеня наповненості шнека, які зумовлені властивостями та особливостями використовуваного електродвигуна. Визначено допустимі значення відстані транспортування, діаметра шнека-транспортера та його інших геометричних параметрів, а також ступеня наповненості шнека, які можливі за параметрів обраного електродвигуна. Обґрунтовано, що для транспортування розсипів місячного реголіту в умовах Місяця найбільш перспективними будуть технологічні рішення на основі шнекового транспорту, оскільки шнековий транспорт малогабаритний і гнучкий, може розміщатися в трубах і нижче рівня денної поверхні, забезпечує безперебійний процес транспортування, його можна автономно використовувати і він може живитися від сонячних батарей.

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

The objective of this article is to develop a scientifically proven method of calculation of the auger conveyor parameters, such as the conveyor capacity and the corresponding power of the electrical motor, for different densities and porosities of conveyed materials, the geometrical parameters of the auger, and the specificity of the gravitational fields at the place of transportation. Another objective is to investigate potential limitations of the auger parameters when transporting lunar regolith. To reach these objectives, the known relations for calculating the auger conveyor parameters were applied, as well as the fundamental laws of the granular media mechanics, the principal equations of asynchronous motor electrostatics, and the behavior of granular media when moving it with the auger conveyor, experimentally studied by the domestic authors. It gave the possibility, for the first time for the lunar environment, to suggest a procedure to calculate the auger conveyor parameters, such as the conveyor capacity and the corresponding power of the electric motor, using known geometrical parameters of the mainline and pipeline, the auger conveyor filling ratio and the parameters of the selected electrical motor. It gave the possibilities to study how the filling ratio of the auger conveyor influences its principal performance parameters and determine potential limitations of the geometrical parameters and the filling ratios of auger conveyors according to the parameters and features of the selected electrical motor. The allowable transportation distances, diameters, other geometrical parameters of auger conveyors, and conveyor filling ratios with the selected electrical motor have been determined. It has been proven that the solutions based on using auger conveyors would be most rational for transporting loose lunar regolith over the Moon's surface because the auger conveyors are compact and adaptable, and they can be placed inside tubes and laid under the day surface, thereby ensuring the continuous transportation process. Furthermore, they are capable of autonomous operation and can use the electricity produced by solar arrays.

Keywords: Moon, regolith, auger, electric motor, capacity, power.

Вступ

Перспективи видобування корисних копалин в умовах Місяця все більше цікавлять дослідників і промисловців на Землі [1–4]. За останні десять років ця тема вже не вважається сферою наукової фантастики, а впевнено належить до технологічних досягнень [5–10]. Так, компанія Komatsu – виробник будівельної техніки – має плани розробити роботизований екскаватор [5]. Він має компонування звичайного екскаватора, але його повністю адаптують до місячних умов. Національне управління з авіації та дослідження космічного простору розробляє роботу Regolith Advanced Surface Systems Operations (RASSOR) з розміщенням у ньому контейнером для реголіту [6]. Цей робот має незвичайний ковшовий барабан, та і взагалі має незвичне компонування, адаптоване під місячні умови.

Уже відомі геологічні обґрунтування можливих видів корисних копалин, а також оцінені потужності їхніх покладів і географічні особливості розташування родовищ на поверхні єдиного природного супутника нашої планети [7, 8]. Ряд наукових колективів розробляють проекти місячних поселень, автоматизованих і пристосованих до тривалого проживання людини [9, 10]. На черзі стоять питання розроблення й обґрунтування можливих технологічних рішень щодо видобування та транспортування корисних копалин як в умовах Місяця, від місця видобування до місця перероблення та відправлення на Землю, так і таких, що гарантуватимуть безпечну та надійну доставку на Землю.

Загальний огляд сучасних досліджень у галузі видобування й оброблення місячного реголіту висвітлено у журналі *Planetary and Space Science* [11]. Також актуальним є розроблення транспортних засобів, так званих місячних лендерів [3]. Більшість фахівців, що працюють над вирішенням проблем освоєння Місяця, схиляються до автономних технологій видобування та транспортування корисних копалин в умовах Місяця. Це зумовлено труднощами доставки, оснащення та забезпечення робочого персоналу всім необхідним, що обмежує можливі види транспорту, залишаючи лише ті, які можуть функціонувати самостійно, без втручання людини, або мають функцію дистанційного

керування. Також майже виключено можливість ремонту та відновлення окремих вузлів технічних засобів, перевагу надають заміні всього агрегату. Тобто використання конвеєрних видів транспорту в місячних умовах наразі є малоїмовірними.

Крім того, в умовах Місяця відсутнє повітря, вода, будь-які гази та рідини, що можуть виконувати функції середовища, яке транспортує сипкий матеріал [12]. Тобто напірний і безнапірний види гідравлічного трубопроводного транспорту не можуть бути використані.

Треба також додати вплив сонячного вітру, електромагнітних полів і той факт, що єдиним джерелом енергії, яку не потрібно доставляти із Землі, є сонячна енергія.

Усе це робить технологічні рішення на основі шнекового транспорту найбільш перспективними для транспортування розсипів місячного реголіту в умовах Місяця. Переваги цих технологій:

- можливість використання електричних двигунів різної потужності, що живляться від сонячних електричних панелей, та оснащення відповідними накопичувачами енергії;

- невеликі геометричні розміри в поперечному перерізі, що дозволяє розміщати їх у трубопроводах;

- збирання шнека із секцій стандартної довжини з використанням шарнірних або карданових з'єднань, що полегшує доставку, монтаж і ремонт транспортера, а також забезпечує його гнучкість.

У земних умовах шнеки використовують для транспортування сипких матеріалів на невеликі відстані з незначними витратами, що у першу чергу пов'язано з необхідністю подолання тертя матеріалу, яке зумовлене силою його ваги та вагою самого шнека [13]. В умовах Місяця ці сили будуть значно меншими, що дозволить підвищити ефективність використання цих технологій та їхню продуктивність. Але відомі методи розрахування параметрів і режимів роботи шнекових транспортерів не адаптовано до умов Місяця [14–16]. Таким чином, для дослідження можливості використання шнекового транспорту для транспортування місячного реголіту необхідно розробити методи визначення їхніх основних технологічних показників, таких як витрата матеріалу та

потужність відповідного електродвигуна, відповідно до параметрів матеріалу, геометричних характеристик шнека й особливостей гравітаційних полів. Це й становить мету цього дослідження.

Особливості конструкції шнека та методів розрахування його параметрів

Прототипом шнекового транспортера є архімедів гвинт, тому такий транспортер складається з корпусу-труби, у якій розміщено вал з безперервною гвинтовою стрічкою, котра утворює неперервний виступ на його поверхні. При розрахуванні параметрів і режимів роботи шнека таку поверхню моделюють окремі лопаті, між якими розміщено сипкий матеріал (рис. 1).

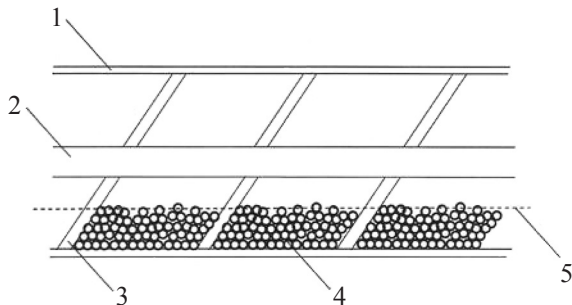


Рис. 1. Принципова схема шнекового транспортера:
1 – корпус-труба шнекового транспортера;
2 – вал шнека; 3 – лопаті шнека; 4 – шар реголіту між лопатями шнека; 5 – узагальнена максимальна висота шару реголіту

Режим руху сипкого матеріалу під час транспортування таким шнеком залежить від кута між його лопатями та валом [14–16]. Якщо цей кут не перевищує значення кута тертя матеріалу, що транспортується, об внутрішню поверхню труби, то матеріал залучатиметься до обертального руху навкруги осі вала шнека. У протилежному разі матеріал, що транспортується, переміщуватиметься у вигляді сипкого шару у нижній частині труби. Саме цей режим розглядатимемо, вважаючи, що виконується така умова:

$$\psi > \varphi; \quad (1)$$

$$\varphi = \arctg f,$$

де ψ – кут між лопаттю шнека та віссю її обертання, рад; f – узагальнений коефіцієнт

тертя матеріалу, що транспортується, об внутрішню поверхню труби; φ – кут тертя матеріалу, що транспортується, об внутрішню поверхню труби, рад.

Більшість дослідників, за умов виконання нерівності (1), пропонують розраховувати об'ємну витрату матеріалу, що транспортується, за такою формулою:

$$Q = \frac{\omega}{4} b R^2 \Xi; \quad (2)$$

$$\Xi = \frac{\Theta - \sin \Theta}{\pi}, \quad (3)$$

де Q – об'ємна витрата матеріалу, що транспортується, $\text{м}^3/\text{с}$; ω – частота обертання вала шнека-транспортера, с^{-1} ; b – крок шнека, м; R – радіус лопаті шнека, м; Ξ – відносна площа поперечного перерізу шару матеріалу, що транспортується; Θ – центральний кут сегмента, що він утворює, який визначається хордою, що відповідає межовій поверхні шару матеріалу, який транспортується, рад; π – константа, що дорівнює 3,14.

У формулі (2) невідомим є частота обертання вала шнека-транспортера, яка за звичайних умов не відрізняється від частоти обертання електричного двигуна. Але для більшості випадків застосування шнека електродвигун обирають зі значним запасом потужності, що є неможливим для умов використання шнека на Місяці. Для таких умов потужність електричного двигуна повинна забезпечувати надійність роботи з мінімальним запасом і визначається за формулою

$$P = \omega M, \quad (4)$$

де P – потужність електричного двигуна, Вт; M – момент на валу шнека-транспортера, який витрачається на подолання сили тертя матеріалу, що транспортується, об внутрішню поверхню труби, Н·м.

Таким чином, для визначення основних технологічних показників шнека, таких як витрата матеріалу та потужність відповідного електродвигуна, необхідно визначити, який момент потрібно прикласти до вала шнека, щоб подолати силу тертя матеріалу, що транспортується, об внутрішню поверхню труби по всій її довжині.

Визначення моменту на валу шнека

Якщо виконуються умови реалізації першого режиму руху, тобто нерівність (1) є правильною, то момент на валу шнека-транспортера, який витрачається на подолання сили тертя матеріалу, що транспортується, об внутрішню поверхню труби, буде обчислюватися за формулами

$$M = \frac{L}{b} M_0 \cos \psi; \quad (5)$$

$$M_0 = 2fg'\rho R^2 b \int_0^{0,5\Theta} h(\theta) d\theta; \quad (6)$$

$$\rho = (1-m)\rho_s, \quad g' = k_g g;$$

$$0 \leq \theta \leq \frac{\Theta}{2},$$

де L – довжина шнека-транспортера, м; M_0 – момент на валу шнека-транспортера, що витрачається на подолання сили тертя матеріалу, що транспортується, об внутрішню поверхню труби між двома послідовними лопатями шнека, Н·м; g' – прискорення вільного падіння в умовах Місяця, м/с²; ρ – густина шару матеріалу, що транспортується, кг/м³; h – поточна товщина шару матеріалу, що транспортується, м; θ – поточний кут у поперечному перерізі шару матеріалу, рад; m – пористість шару матеріалу, що транспортується, змінюється від 0,42 до 0,54, д. од. [17]; ρ_s – густина матеріалу, що транспортується, змінюється від 1300 до 2000 кг/м³ [17]; k_g – коефіцієнт змінення прискорення вільного падіння в умовах Місяця у порівнянні із земними умовами, 0,1655 [18]; g – прискорення вільного падіння в земних умовах, м/с².

Розглядаючи висоту шару сипкого матеріалу у площині лопаті шнека, неважко встановити, що (рис. 2, 3)

$$\mu = \eta - 2 \sin^2 \frac{\theta}{2}; \quad (7)$$

$$\eta = 2 \sin^2 \frac{\Theta}{4}; \quad (8)$$

$$\mu = \frac{h}{R}; \quad \eta = \frac{h_0}{R},$$

де μ – відносна поточна товщина шару матеріалу, що транспортується (рис. 2); η –

ступінь наповненості шнека-транспортера (рис. 3); h_0 – максимальна товщина шару матеріалу, що транспортується, м.

Підставивши формули (7) і (8) у підінтегральний вираз у (6) та виконавши операцію інтегрування, після певних перетворень будемо мати (рис. 4)

$$M_0 = fg'\rho R^3 b \Omega; \quad (9)$$

$$\Omega = \sin \frac{\Theta}{2} - \Theta \cos \frac{\Theta}{2},$$

де Ω – геометрична характеристика шару матеріалу, що транспортується (рис. 4).

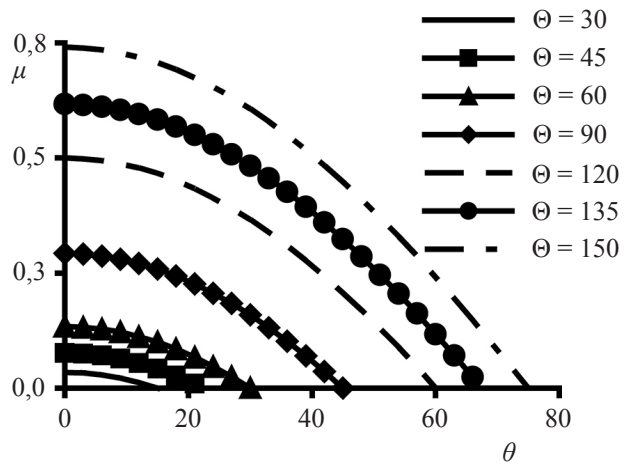


Рис. 2. Залежність відносної висоти шару матеріалу, що транспортується, від поточного кута для різних центральних кутів сегмента, що він утворює

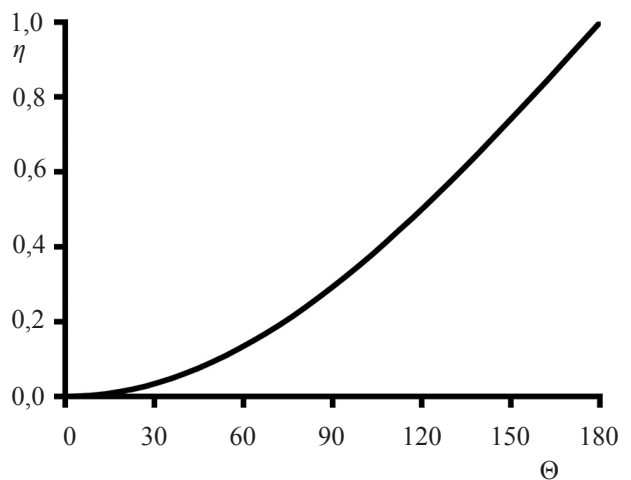


Рис. 3. Залежність ступеня наповненості шнека-транспортера від центрального кута сегмента, який утворює шар матеріалу, що транспортується

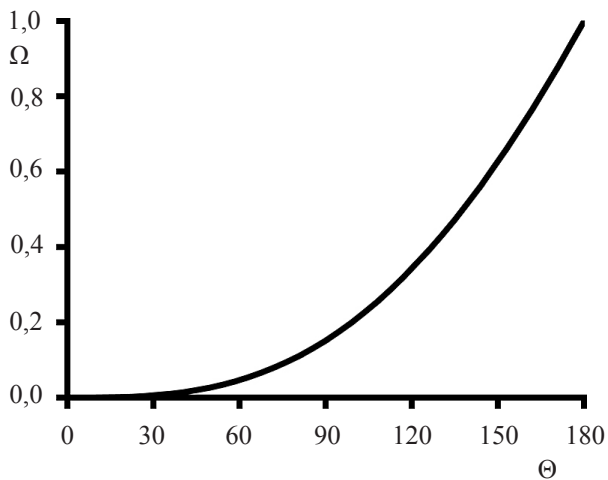


Рис. 4. Залежність геометричної характеристики шару матеріалу, що транспортується, від центрального кута сегмента, який утворює шар матеріалу, що транспортується

Оскільки розглядається режим руху матеріалу без перемішування і виконується умова (1), то максимальний ступінь наповненості шнека обмежується радіусом вала шнека, тобто максимально можливе значення центрального кута сегмента, що він утворює, реалізується, коли хорда, що відповідає межовій поверхні шару матеріалу, який транспортується, торкається вала шнека (рис. 5):

$$\Psi = 2 \arccos(x); \quad (10)$$

$$x = \frac{R_0}{R},$$

де Ψ – максимально можливе значення центрального кута сегмента, що він утворює, коли хорда, що відповідає межовій поверхні шару матеріалу, який транспортується, торкається вала шнека, рад; x – відносний радіус вала шнека; R_0 – радіус вала шнека, м.

Числове оброблення даних з рис. 5 свідчить, що залежність (10) добре апроксимується лінійною функцією

$$\Psi = 120x + 60,8.$$

З рис. 5 та відповідної апроксимації витікає, що ступінь наповненості шнека-транспортера не перевищує 0,4, що дозволяє отримати апроксимацію залежності геометричної характеристики шару матеріалу, що транспортується, від ступеня наповненості шнека-транспортера степеневою функцією (рис. 6)

$$\Omega = 0,961\eta^{1,5}. \quad (11)$$

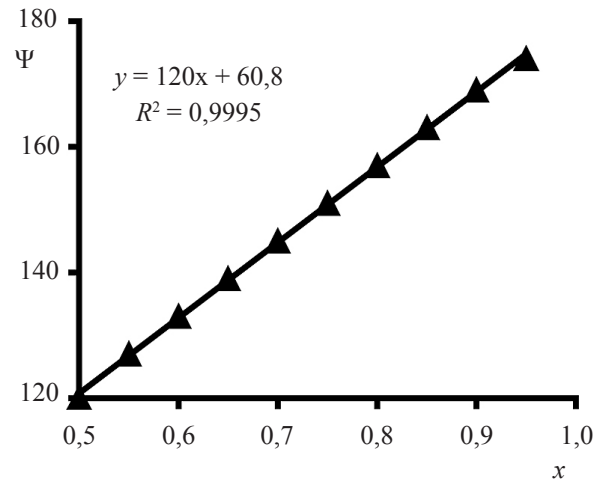


Рис. 5. Залежність максимально можливого значення центрального кута сегмента, що він утворює, від відносного радіуса вала шнека

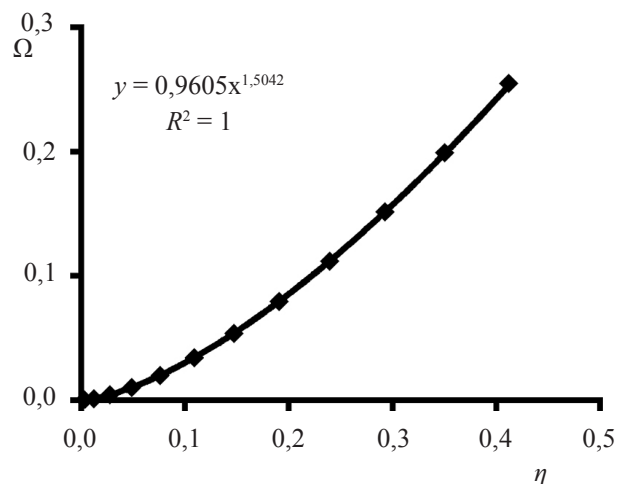


Рис. 6. Апроксимація залежності геометричної характеристики шару матеріалу, що транспортується, від ступеня наповненості шнека-транспортера

Розглядаючи разом формули (5), (9) та (11), після відповідних перетворень отримуємо таке рівняння для визначення моменту на валу шнека-транспортера, який витрачається на подолання сили тертя матеріалу, що транспортується, об внутрішню поверхню труби:

$$M = 0,961\eta^{1,5} g' \rho LR^3 f \cos \psi. \quad (12)$$

Треба зауважити, що місячний пил може істотно впливати на рухомі частини шнека. Урахування цього чинника є актуальним як для цілісності рухомих частин шнека, так і для його ефективного функціонування [14].

Визначення технологічних показників

В умовах Місяця найбільш доступним видом енергії є електрична енергія, а найбільш малогабаритними електричними двигунами є асинхронні двигуни. Для цього типу електродвигунів момент на валу зумовлює обертання ротора двигуна, що призводить до взаємодії з електромагнітним полем статора двигуна, а рівновага двох цих чинників обумовлює частоту обертання ротора, що визначається з розв'язання такого рівняння [18]:

$$M = \frac{2M_m(1+s_k)s_k}{(s^2+s_k s+s_k^2)} s; \quad (13)$$

$$s = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0}; \quad s_k = \frac{R_2}{x_2};$$

$$M_m = \frac{3U^2}{2(x_c + x_p)},$$

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} ; U – фазна напруга обмотки статора, В; x_c – активний опір статора електродвигуна, Ом; x_p – активний опір ротора електродвигуна, Ом; R_2 – приведений активний опір ротора, Ом; x_2 – реактивний опір ротора, Ом.

Формула (13) перетворюється на квадратне рівняння відносно ковзання електричного двигуна [18]

$$S^2 - \mathcal{G}S + 1 = 0; \quad (14)$$

$$S = \frac{s}{s_k};$$

$$\mathcal{G} = 2 \frac{M_m}{M} (1 + s_k) - 1, \quad (15)$$

обидва розв'язання якого мають вигляд

$$S_{1,2} = \frac{\mathcal{G}}{2} \pm \sqrt{\frac{\mathcal{G}^2}{4} - 1}, \quad (16)$$

де S – відносне ковзання; \mathcal{G} – електрично-механічний параметр.

Для використання формули (16) необхідно, щоб корені були неухвними, додатними та більше одиниці, оскільки для стійкої ро-

боти електродвигуна ковзання повинне бути більше за критичне значення. Задовольнити ці вимоги може тільки одне з розв'язань (16) рівняння (14), яке дозволяє визначити частоту обертання ротора електродвигуна за такою формулою [18]:

$$\omega = \omega_0 \left(1 - s_k \frac{\mathcal{G}}{2} - s_k \sqrt{\frac{\mathcal{G}^2}{4} - 1} \right). \quad (17)$$

За допомогою формул (2), (4) та (17) стає можливим обчислити як об'ємну витрату матеріалу, що транспортується, так і необхідну потужність електродвигуна. Ураховуючи обмеження, за яких отримано апроксимацію (11), отримуємо аналогічну апроксимацію для залежності (3) (рис. 7):

$$\Xi = 0,524\eta^{1,44},$$

що дозволяє обчислити об'ємну витрату матеріалу, що транспортується, таким чином:

$$Q = 0,131\eta^{1,44} \omega R^2 b. \quad (18)$$

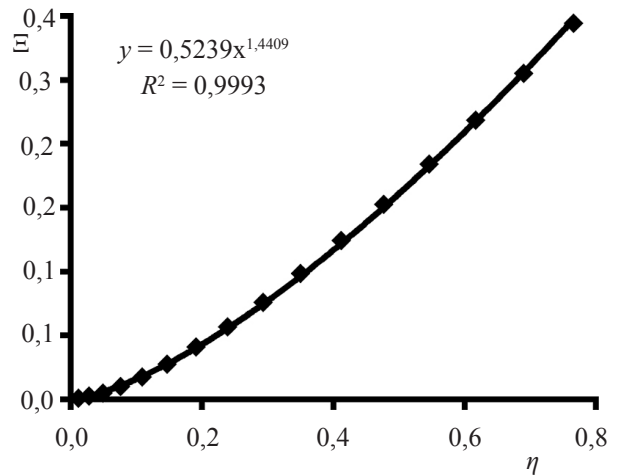


Рис. 7. Залежність відносної площі поперечного перерізу шару матеріалу, що транспортується, від ступеня наповненості шнека-транспортера

Таким чином, розглянувши разом формули (18), (4), (17) і (15), отримуємо

$$Q = \frac{\eta^{1,44} R^2 b \omega_0}{7,634} \left(1 - s_k \frac{\mathcal{G}}{2} - s_k \sqrt{\frac{\mathcal{G}^2}{4} - 1} \right); \quad (19)$$

$$P = \frac{\omega_0 M_m (1 + s_k)}{0,5} \frac{1 - s_k \frac{\mathcal{G}}{2} - s_k \sqrt{\frac{\mathcal{G}^2}{4} - 1}}{1 + \mathcal{G}}. \quad (20)$$

Формули (19) та (20) дозволяють розрахувати технологічні показники шнека-транспортера: за відомими геометричними характеристиками магістралі та трубопроводу, ступенем наповненості шнека та параметрами електродвигуна, що обрано.

Обмеження технологічних показників

Але формули (19) та (20) дозволяють розрахувати не тільки технологічні показники шнека-транспортера, коли відомі умови його використання. За допомогою цих формул можна визначити відстань транспортування, діаметр шнека й інші його геометричні параметри, а також ступінь наповненості шнека, які можливі за параметрів електродвигуна, що обрано.

Так, значення коренів (16) будуть дійсними, якщо виконується така умова:

$$\frac{2}{3}(1+s_k)M_m \geq M,$$

за допомогою формули (12) ця нерівність може бути переписана як обмеження для відстані транспортування та геометричних характеристик шнека-транспортера:

$$\eta^{1,5}LR^3 \leq 0,694 \frac{(1+s_k)M_m}{g'\rho f \cos\psi}. \quad (21)$$

Наступне обмеження обумовлене небезпекою великого нагрівання обмоток статора, який ініціює ковзання. Зазвичай тепловий захист налаштовано на певну температуру обмоток, після досягнення якої відбувається відключення електропостачання. Тобто існує обмеження такого виду:

$$S \geq [S],$$

яке за допомогою формули (12) переписемо так:

$$\eta^{1,5}LR^3 \leq \frac{2,081[S]}{1+[S]+[S]^2} \frac{M_m(1+s_k)}{g'\rho f \cos\psi}, \quad (22)$$

де $[S]$ – допустиме значення відносного ковзання.

Якщо електродвигун уже обрано, то потужність його відома і вона обмежена. Тобто навантаження на вал шнека-транспортера не

може перевищувати номінальну потужність електродвигуна:

$$P \leq [P], \quad (23)$$

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

Розглянувши формули (20) та (23), після відповідних перетворень отримаємо такі обмеження:

$$\frac{q}{1+p}\Gamma \leq \eta^{1,5}LR^3 \leq \frac{q}{1-p}\Gamma; \quad (24)$$

$$\Gamma = \frac{0,52[P]}{\omega_0 g' \rho f \cos\psi};$$

$$q = \frac{\nu + 2s_k}{2\nu^2 + \left(\frac{5}{2}s_k - 1\right)\nu - \frac{s_k}{2}};$$

$$p = \frac{\frac{s_k}{2}\sqrt{1-2(1+4s_k)\nu-3\nu^2}}{2\nu^2 + \left(\frac{5}{2}s_k - 1\right)\nu - \frac{s_k}{2}};$$

$$\nu = \frac{0,5[P]}{\omega_0 M_m (1+s_k)}.$$

Таким чином, застосовуючи обмеження (21)–(24), можливе безпечне використання формул (19) та (20) та визначення допустимих значень відстані транспортування, діаметра шнека та інших його геометричних параметрів а також ступеня наповненості шнека, які можливі за параметрів електродвигуна, що обрано.

Висновки

1. Вперше для умов Місяця запропоновано методику розрахування технологічних показників шнека-транспортера, таких як витрата матеріалу та потужність відповідного електродвигуна, за відомими геометричними характеристиками магістралі та трубопроводу, ступенем наповненості шнека та параметрами електродвигуна, що обрано.

2. Встановлено можливі обмеження геометричних параметрів і ступеня наповненості шнека-транспортера, які зумовлені

властивостями й особливостями електродвигуна, який використовують.

3. Сумісний розгляд обмежень та отриманих формул дозволяє визначити допустимі значення відстані транспортування, діаметра шнека й інших його геометричних параметрів а також, ступеня наповненості шнека, які можливі за параметрів електродвигуна, що обрано.

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

Список використаної літератури

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

2. Семененко П. В. Способы транспортировки полезных ископаемых от места их добычи к месту переработки в лунных условиях. П. В. Семененко, Д. Г. Грошелев, Г. Г. Осинский, Е. В. Семененко, Н. В. Осадчая. XVII конф. молодых ученых «Геотехнічні проблеми розробки родовищ». м. Дніпро, 24 жовтня 2019 р. С. 7.

3. Бердник А. И. Многоразовый лунный лендер. А. И. Бердник, М. Д. Каляпин, Ю. А. Лысенко, Т. К. Бугаенко. Ракетно-космічні комплекси. 2019. Т. 25. № 5:3–10. ISSN 1561-8889.

4. Семененко Е. В., Осадчая Н. В. Традиционные и нетрадиционные виды энергии, а также космические полезные ископаемые в околоземном пространстве. Науч.-практ. конф. «Современные расчетно-экспериментальные методы определения характеристик ракетно-космической техники», м. Дніпро, 10–12 грудня 2019 р. С. 62–63.

5. Komatsu побудує екскаватор для роботи на Місяці <https://www.autocentre.ua/ua/news/concept/komatsu-postroit-ekskavator-dlya-raboty-na-lune-1380272.html>.

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

7. Robert E. Grimm. Geophysical constraints on the lunar Procellarum KREEP Terrane. Vol. 118, Issue 4. April 2013. P. 768-778. <https://agupubs.onlinelibrary-wiley-com.translate>.

[https://doi.org/10.1029/2012JE004114](https://doi.org/10.1029/2012JE004114?x_tr_sl=en&x_tr_tl=ru&x_tr_hl=ru&x_tr_pto=sc)

8. Chen Li. A novel strategy to extract lunar mare KREEP-rich metal resources using a silicon collector. Kuixian Wei, Yang Li, Wenhui Ma, Yun Lei, Han Yu, Jianzhong Liu. Journal of Rare Earths Vol. 41, Issue 9, September 2023, P. 1429–1436. <https://www.sciencedirect-com.translate>.

<https://doi.org/10.1016/j.jre.2022.07.002>

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

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

11. Just G. H. Parametric review of existing regolith excavation techniques for lunar In Situ Resource Utilisation (ISRU) and recommendations for future excavation experiments. G. H. Just, Smith K., Joy K. H., Roy M. J. <https://doi.org/10.1016/j.pss.2019.104746> <https://www.sciencedirect-com.translate>.

12. Anthony J. Analysis of Lunar Regolith Thermal Energy Storage. Anthony J. Colozza Sverdrup Technology, Inc. Lewis Research Center Group Brook Park, Ohio NASA Contractor Report 189073. November 1991. S-9 <https://denning.atmos.colostate.edu/readings/lunar.regolith.heat.transfer.pdf>

13. Обґрунтування використання шнека для утилізації відходів вуглезбагачення з можливістю підвищення безпеки енергетичної системи підприємств. Слободяникова І. Л., Подоляк К. К., Тепла Т. Д. Матеріали XXI Міжнарод. конф. молодих вчених (26 жовт. 2023 року, м. Дніпро). Дніпро: ІГТМ ім. М.С. Полякова НАН України, 2023. С. 50–55.

14. 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.

15. 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.

16. Гевко Р. Б., Вітровий А. О., Пік А. І. Підвищення технічного рівня гнучких гвинтових конвеєрів. Тернопіль: Астон, 2012. 204 с.

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

18. New Views of the moon. Reviews in mineralogy and geochemistry. Eds. Joliff B.L., Wieczorek M.A., Shearer C.K., Neal C.R. Mineralogical Society of America. Reviews in mineralogy and geochemistry. 2006. Vol. 60. 721 p. DOI: 10.2138/rmg.2006.60.

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

Стаття надійшла 14.02.2024