

## ВИЗНАЧЕННЯ РАЦІОНАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ ВЕРТИКАЛЬНОЇ ГВИНТОВОЇ ПОВЕРХНІ ДЛЯ ТРАНСПОРТУВАННЯ МАТЕРІАЛУ З МАКСИМАЛЬНОЮ ОСЬОВОЮ ШВИДКІСТЮ

*Описано вирішення рівняння залежності максимальної осьової швидкості транспортування матеріалу від заданих геометричних параметрів і частоти обертання гвинтової поверхні та властивостей вантажу.*

*Ключові слова: осьова швидкість, транспортування, гвинтова поверхня.*

*Описано решение уравнения зависимости максимальной осевой скорости транспортирования материала от заданных геометрических параметров и частоты вращения винтовой поверхности и свойств груза.*

*Ключевые слова: осевая скорость, транспортировка, винтовая поверхность.*

*The solution of the correlation equation is described for the material transportation maximum axial speed depending upon the preset geometric parameters as well as on the spiral surface rotation frequency and on load properties.*

*Key words: axial speed, transportation, spiral surface.*

**Постановка проблеми.** Гвинтові поверхні є складовою частиною багатьох робочих органів, які широко використовуються у транспортуючих машинах, буровому робочому обладнанні, у землерийних та землерийно-транспортних машинах для інтенсифікації робочих процесів і транспортування розроблюваного ґрунту (рисунок 1). Ефективність перелічених машин у першу чергу залежить від продуктивності виконання технологічних операцій і, якщо гвинтовим робочим органом виконується основний робочий процес, то його параметри повинні забезпечити максимальну продуктивність машини згідно з її технічною характеристикою. Продуктивність робочих органів із гвинтовими поверхнями залежить від осьової швидкості транспортування і відповідно її максимальне значення забезпечить максимальну продуктивність транспортування. Осьова швидкість транспортування залежить від геометричних параметрів гвинтової поверхні, частоти обертання привідного вала робочого органа, фізико-механічних властивостей вантажу.

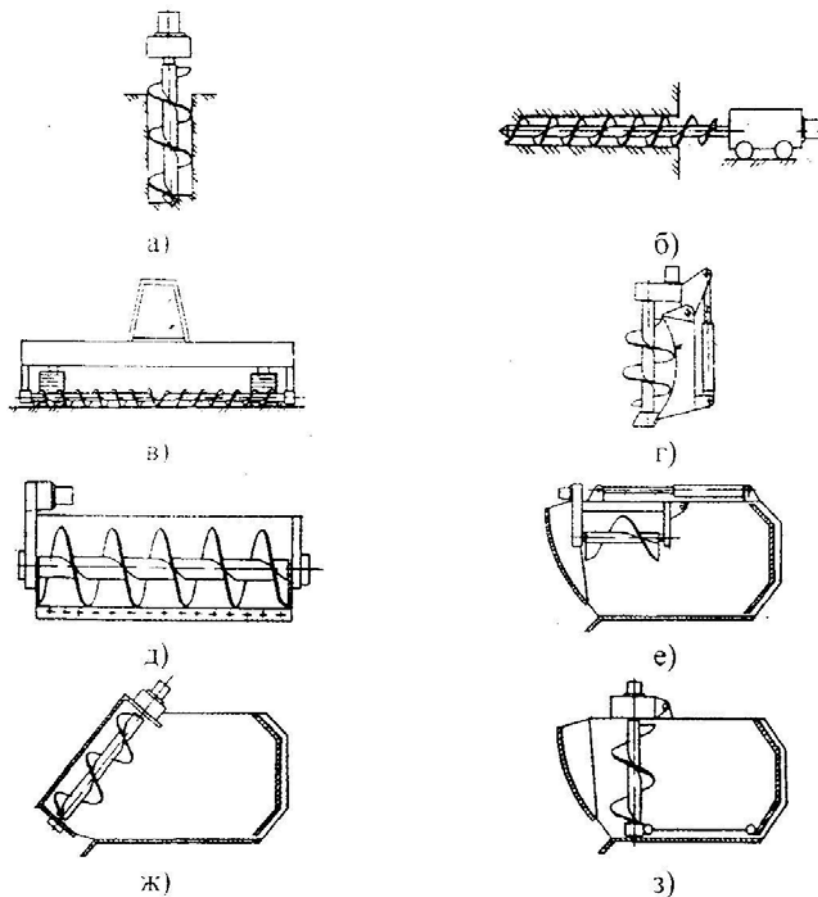


Рисунок 1 – Приклади використання гвинтошнекових пристроїв для інтенсифікації робочого процесу дорожньо-будівельних машин і як самостійного робочого обладнання

**Аналіз останніх досліджень і виділення нерозв’язаних раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується стаття.** Дослідження впливу геометрії та кінематики гвинтових робочих органів на параметри руху вантажу, а також розробленням методик розрахунку займалися А.В. Григор’єв, Б.А. Катанов, А.О. Співаковський та ін. Їх результати присвячені переважно складанню теоретичних математичних моделей для зв’язку параметрів гвинтового робочого органа і режиму його роботи з властивостями вантажу, але вони не дають кінцевих рівнянь або формул для інженерного розрахунку раціональних параметрів вертикальних гвинтових робочих органів. У методиках розрахунку рекомендовані значення параметрів мають достатньо велику розбіжність, залежності містять емпіричні коефіцієнти, окремі параметри визначаються з графічних залежностей.

**Формулювання цілей статті.** Отримання аналогічних рівнянь та залежностей для визначення параметрів вертикальних гвинтових поверхонь робочих органів транспортуючих і землерийних машин, які відповідають максимальній осьовій швидкості транспортування.

**Виклад основного матеріалу.** Для вирішення поставленої мети розглянемо план швидкостей руху частки вантажу масою  $m$  по периферії

гвинтової поверхні і контакті її з боковою поверхнею кожуха при критичній частоті обертання приводного вала (рисунок 2), а також умову рівноваги цієї частки на гвинтовій поверхні у координатних осях  $n$  і  $\tau$ .

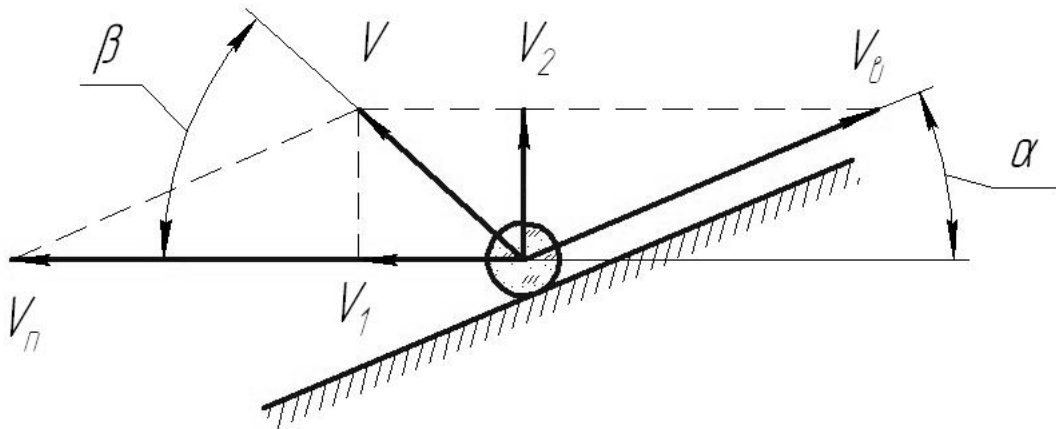


Рисунок 2 – План швидкостей руху частки по гвинтовій поверхні

Вектор абсолютної швидкості руху дорівнює

$$\vec{V} = \vec{V}_0 + \vec{V}_n, \quad (1)$$

де  $\vec{V}_0$  – вектор відносної швидкості руху частки по гвинтовій поверхні;

$\vec{V}_n$  – вектор переносної швидкості руху частки разом із гвинтовою поверхнею.

Переносна швидкість руху дорівнює

$$\vec{V}_n = \omega_0 \cdot R, \quad (2)$$

де  $\omega_0$  – кутова швидкість обертання гвинтової поверхні;

$R$  – радіус гвинтової поверхні.

Із плану швидкостей абсолютна швидкість руху частки дорівнює

$$V = \frac{\omega_0 \cdot R \cdot \sin \alpha}{\sin(\alpha + \beta)}, \quad (3)$$

де  $\alpha = \arctg \frac{S}{2\pi R}$  – кут підйому зовнішньої кромки гвинтової поверхні;

$S$  – крок гвинтової поверхні;

$\beta$  – кут нахилу вектора абсолютної швидкості частки до горизонтальної площини.

Горизонтальна проекція абсолютної швидкості

$$V_2 = V \cdot \cos \beta = \frac{\omega_0 \cdot R \cdot \sin \alpha \cdot \cos \beta}{\sin(\alpha + \beta)}. \quad (4)$$

Складову  $V_2$  можна записати, як  $V_2 = \omega \cdot R$ , де  $\omega$  – абсолютна кутова швидкість обертання частки. З урахуванням виразу (4)

$$\omega = \frac{\omega_0 \cdot \sin \alpha \cdot \cos \beta}{\sin(\alpha + \beta)}. \quad (5)$$

Рівняння рівноваги частки (рисунок 3) мають наступний вигляд:

$$\sum n = 0; \quad N - G \cdot \cos \alpha - F_{TP.K} \cdot \sin(\alpha + \beta) = 0; \quad (6)$$

$$\sum \tau = 0; \quad F_{TP.K} \cdot \cos(\alpha + \beta) - F_{TP.G} - G \cdot \sin \alpha = 0, \quad (7)$$

де  $N$  – нормальна реакція гвинтової поверхні на частку;

$G = m \cdot g$  – вага частки;

$F_{TP.K}$  – сила тертя частки по боковій поверхні кожуха;

$F_{TP.G}$  – сила тертя частки по гвинтовій поверхні.

Сили  $F_{TP.K}$  і  $F_{TP.G}$  дорівнюють

$$F_{TP.K} = m \cdot \omega^2 \cdot R \cdot \operatorname{tg} \rho, \quad (8)$$

$$F_{TP.G} = N \cdot \operatorname{tg} \delta, \quad (9)$$

де  $\rho$  – кут тертя частки по боковій поверхні кожуха;

$\delta$  – кут тертя частки по гвинтовій поверхні.

З урахуванням виразів (8) і (9), а також виключаючи  $N$  з системи рівнянь (6), (7), отримуємо наступну залежність:

$$\omega^2 \cdot R = \frac{g \cdot (\sin \alpha + \cos \alpha \cdot \operatorname{tg} \delta)}{\operatorname{tg} \rho [\cos(\alpha + \beta) - \operatorname{tg} \delta \cdot \sin(\alpha + \beta)]}. \quad (10)$$

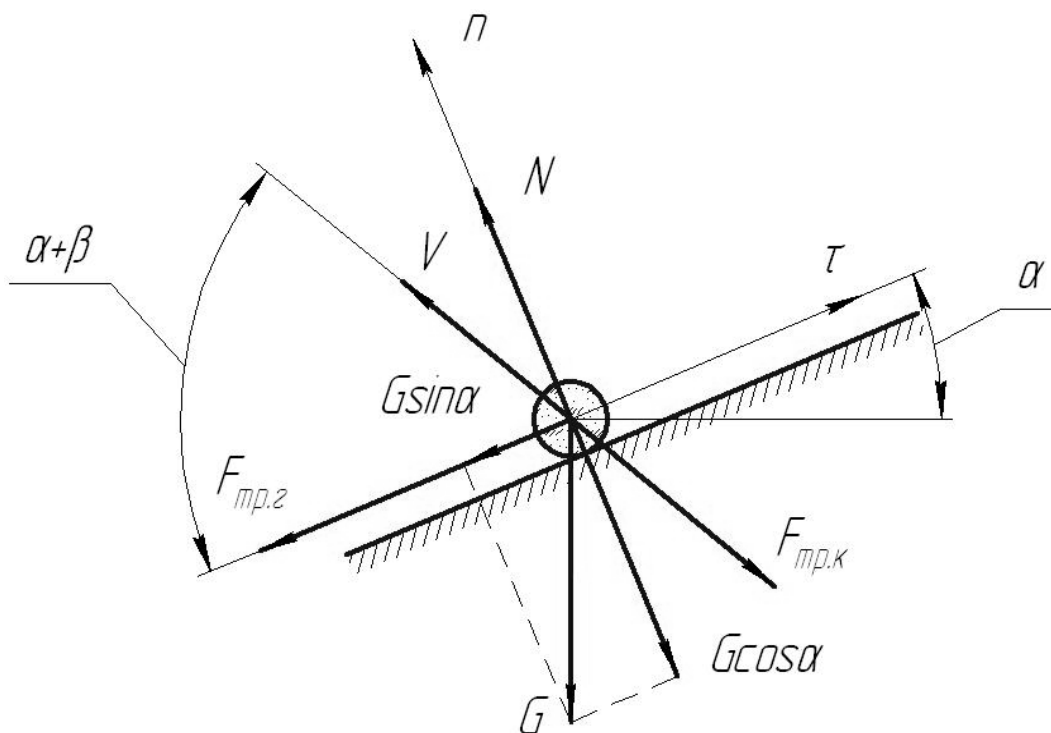


Рисунок 3 – Схема сил, що діють на частку при сталому руху по краю гвинтової поверхні

Увівши позначення  $A = \frac{g \cdot (\sin \alpha + \cos \alpha \cdot \operatorname{tg} \delta)}{\operatorname{tg} \rho}$  і враховуючи, що

$$\cos(\alpha + \beta) - \operatorname{tg} \delta \cdot \sin(\alpha + \beta) = \frac{\cos(\delta + \alpha + \beta)}{\cos \delta}, \text{ рівняння (10) має вигляд}$$

$$\omega^2 \cdot R = \frac{A \cdot \cos \delta}{\cos(\delta + \alpha + \beta)}. \quad (11)$$

Залежності (5) і (11) утворюють систему рівнянь із невідомими параметрами  $\omega$  та  $\beta$

$$\omega = \frac{\omega_0 \cdot \sin \alpha \cdot \cos \beta}{\sin(\alpha + \beta)}; \quad (12)$$

$$\omega^2 \cdot R = \frac{A \cdot \cos \delta}{\cos(\delta + \alpha + \beta)}. \quad (13)$$

Якщо поділити (12) на  $\omega_0$ , а (13) на  $\omega_0^2 \cdot R$ , та позначити відношення

$$\frac{\omega}{\omega_0} = U, \text{ система (12), (13) дістає вигляд}$$

$$U = \frac{\sin \alpha \cdot \cos \beta}{\sin(\alpha + \beta)}; \quad (14)$$

$$U^2 = \frac{A \cdot \cos \delta}{\omega_0^2 \cdot R \cdot \cos(\delta + \alpha + \beta)}. \quad (15)$$

Після перетворювань із системи (14), (15) можна отримати трансцендентне рівняння для визначення кута  $\beta$  нахилу вектора абсолютної швидкості до горизонтальної площини

$$F(\beta) = \frac{A \cdot \cos \delta \cdot (1 + \operatorname{tg} \beta \cdot \operatorname{ctg} \alpha)^2}{\omega_0^2 \cdot R} - \cos(\alpha + \delta + \beta) = 0. \quad (16)$$

Для отримання аналітичних залежностей для визначення кута  $\beta$  нахилу вектора абсолютної швидкості частки, користуємося тим, що функцію  $\cos x$  можна надати у вигляді  $\cos x \approx 1 - \frac{x^2}{2}$ , а для малих кутів  $\operatorname{tg} x \approx x$ . Тоді рівняння (16) має вигляд

$$\frac{A \cdot \cos \delta \cdot (1 + \beta \cdot \operatorname{ctg} \alpha)^2}{\omega_0^2 \cdot R} + 0,5[\beta + (\alpha + \delta)]^2 - 1 = 0; \quad (17)$$

або

$$(0,5 + B \cdot \operatorname{ctg}^2 \alpha) \beta^2 + [2B \cdot \operatorname{ctg} \alpha + (\alpha + \delta)] \beta + [0,5(\alpha + \beta)^2 + B - 1] = 0, \quad (18)$$

$$\text{де } B = \frac{A \cdot \cos \delta}{\omega_0^2 \cdot R}.$$

Нехай  $a = 0,5 \cdot B \cdot \operatorname{ctg}^2 \alpha$ ,  $b = 2B \cdot \operatorname{ctg} \alpha + (\alpha + \beta)$ ,  
 $c = 0,5 \cdot (\alpha + \beta)^2 + B - 1$ , то позитивне розв'язання квадратного рівняння (18)  
відносно  $\beta$  має вигляд

$$\beta = \frac{\sqrt{b^2 - 4ac} - b}{2a}. \quad (19)$$

Осьова швидкість частки  $V_{BIC}$  дорівнює вертикальній складовій  $V_2$   
абсолютної швидкості  $V$  (рисунок 2) і визначається формулою

$$V_{BIC} = V_2 = \omega R \cdot \operatorname{tg} \beta, \quad (20)$$

або з врахуванням виразу (5) та перетворень

$$V_{BIC} = \frac{\omega_0 R}{(\operatorname{ctg} \alpha + \operatorname{ctg} \beta)}. \quad (21)$$

Залежність (19) являє собою функцію  $\beta = f(\alpha)$ .

Максимальна осьова швидкість згідно з планом швидкостей (рисунок 2) буде найближчою, коли кут  $\beta$  має максимальне значення  $\beta_{\max}$ . Для вертикального кута підйому гвинтової поверхні  $\alpha$  при  $\beta_{\max}$  потрібно взяти першу похідну функції  $\beta = f(\alpha)$  і прирівняти її до нуля

$$F(\alpha) = \frac{df(\alpha)}{d\alpha} = 0. \quad (22)$$

Розв'язання рівняння  $F(\alpha) = 0$  дає можливість знайти раціональний кут  $\alpha_p$ , при якому відбувається рух частки з максимальною осьовою швидкістю  $V_{BIC.MAX}$ .

Після диференціювання функції  $\beta = f(\alpha)$  згідно з виразом (19) по куту  $\alpha$  і відповідних перетворювань рівняння (22) має вигляд:

$$F(\alpha) = a(b - \sqrt{b^2 - 4ac})b' + (b\sqrt{b^2 - 4ac} - b^2 + 2ac)a' - 2a^2c' = 0, \quad (23)$$

де

$$a' = \frac{da}{d\alpha} = -\frac{g}{\omega_0^2 R \cdot \operatorname{tg} \rho}. \quad (24)$$

$$\cdot \left[ 2 \cos \delta \cdot \operatorname{ctg} \alpha (1 + 0,5 \operatorname{ctg} \alpha \cdot \cos \alpha) + 2 \sin \delta \cdot \operatorname{ctg}^2 \alpha \left( \frac{1,5}{\sin \alpha} + \operatorname{ctg} \alpha \right) \right]$$

$$b' = \frac{db}{d\alpha} = 1 - \frac{2g}{\omega_0^2 R \cdot \operatorname{tg} \rho} \cdot \left[ \cos \delta \cdot \sin \alpha + 2 \sin \delta \cdot \cos \alpha (1 + \operatorname{ctg}^2 \alpha) \right]; \quad (25)$$

$$c' = \frac{dc}{d\alpha} = (\alpha + \delta) + \frac{g \cdot \cos(\alpha + \delta)}{\omega_0^2 R \cdot \operatorname{tg} \rho}. \quad (26)$$

Розв'язання рівняння (23) та знаходження кута  $\alpha_p$  можливе чисельним методом, наприклад, за допомогою метода Ньютона.

Максимальна осьова швидкість частки згідно з формулою (21) дорівнює

$$V_{VIC.max} = \frac{\omega_0 R}{(ctg\alpha_p + ctg\beta_{max})}, \quad (27)$$

де  $\beta_{max}$  розраховується за формулою (19) при  $\alpha_p$ .

Згідно з розглянутою методикою, наприклад, для вертикального робочого органа з гвинтовою поверхнею діаметром  $D=0,2\text{м}$ , частотою обертання привідного вала  $n=250\text{ хв}^{-1}$ , кутами тертя  $\rho=\delta=20^\circ$  максимальна осьова швидкість руху частки буде дорівнювати  $V_{vic.max} = 0,36\text{ м/с}$  при  $S/D=1,5$ .

**Висновки та перспективи подальших досліджень.** На базі кінематичного та силового аналізу руху частки матеріалу по вертикальній гвинтовій поверхні транспортуючого робочого органа отримані залежності для визначення кінематичних параметрів руху, таких як осьова швидкість, абсолютна кутова швидкість, кут нахилу вектора абсолютної швидкості при заданих геометричних параметрах і частоті обертання гвинтової поверхні, властивостях вантажу. Аналіз отриманих залежностей на екстремум дозволив розробити методику визначення раціонального співвідношення кроку гвинтової поверхні до її діаметра, при якій відбувається максимальна осьова швидкість руху частки і відповідно найбільша продуктивність гвинтового робочого органа.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Григорьев А.В. Винтовые конвейеры / А.В. Григорьев. – М.: Машиностроение, 1972. – 184с.
2. Катанов Б.А. Режущий буровой инструмент / Б.А. Катанов, М.С. Самохин. – М.: Машиностроение, 1976. – 136с.
3. Спиваковский А.О. Транспортирующие машины / А.О. Спиваковский, В.К. Дьячков. – М.: Машиностроение, 1968. – 385с.
4. Баловнев В.И. Интенсификация земляных работ в дорожном строительстве / В.И. Баловнев, Л.А. Хмара. – М.: Транспорт, 1983. – 183с.
5. Хмара Л.А. Интенсификация рабочих процессов машин для земляных работ / Л.А. Хмара. – Д.: ДИСИ, 1989. – 329с.