

Галузеве машинобудування

УДК 621.878

DOI <https://doi.org/10.32347/tb.2023.2-39.0201>

Леонід Хмара,

доктор технічних наук,
професор кафедри будівельних і дорожніх машин,
Придніпровська державна академія будівництва та архітектури,
вул. Архітектора Олега Петрова, 24а, м. Дніпро, 49005, Україна
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3050-9302>
E-mail: khmara.leonid@pdaba.edu.ua

Олександр Голубченко,

кандидат технічних наук,
завідувач кафедри будівельних і дорожніх машин,
Придніпровська державна академія будівництва та архітектури,
вул. Архітектора Олега Петрова, 24а, м. Дніпро, 49005, Україна
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2971-1263>
E-mail: holumchenko.oleksandr@pdaba.edu.ua

ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОЧОГО ПРОЦЕСУ КОСОВСТАНОВЛЕНОГО ВІДВАЛЬНОГО РОБОЧОГО ОРГАНУ ІЗ ЛОПАТЕВИМ СФЕРИЧНИМ МЕТАЛЬНИКОМ ДЛЯ КЕРОВАНОГО БІЧНОГО ТРАНСПОРТУВАННЯ ҐРУНТУ

АНОТАЦІЯ. Постановка проблеми. При виробництві земляних робіт одним із вирішальних факторів вибору землерийних машин для їх виконання є геометричні розміри, форма та об'єм земляних споруд. Серед них розповсюджені протяжні споруди у вигляді насипів та корит для автомобільних та залізничних доріг, меліоративні канали, а також земляні роботи по відділенню поверхневих шарів чорнозему, зворотної засипки траншей, будівництва оборонних об'єктів. Також експлуатаційні роботи по зимовому утриманню автомобільних доріг характеризуються протяжністю. Виконання вказаних робіт у більшості випадків потребує бічного переміщення ґрунту із резервів у земляну споруду при будівництві насипів, зворотної засипки або навпаки при спорудженні каналів, рівчаків, пошаровому зрізанні ґрунту з його видаленням. Відомо, що значно підвищити продуктивність виконання земляних робіт у цих випадках дозволяє використання землерийно-транспортних машин безперервної дії до серійних зразків яких відносяться бульдозери з косовстановленим відвалом, автогрейдер, грейдер-елеватори. Вони здатні забезпечити зрізання ґрунту та його бічне переміщення. Однак суттєвим недоліком землерийно-транспортних машин з косовстановленими відвалами – це неможливість транспортування ґрунту на значну відстань за його межі. Відстань бічного транспортування ґрунту грейдер-елеватором обмежується довжиною конвеєра. Збільшення відстані та висоти відсипки ґрунту створює необхідність збільшення габаритних розмірів та ваги машини із-за подовження транспортера, що робить машину важкою, громіздкою, неповоротною та малоефективною. Одним із напрямів вдосконалення машин для земляних робіт впровадження інтенсифікаторів, які дозволяють збільшити продуктивність та відстань бічного транспортування ґрунту. Тому підвищення ефективності відвальних робочих органів за рахунок впровадження інтенсифікаторів для збільшення відстані та зміни напрямку бічного транспортування ґрунту є актуальною проблемою. Мета статті. Підвищення ефективності керованого бічного транспортування ґрунту косовстановленим відвалом за рахунок використання лопатевого сферичного метальника. Висновок. Результатами випробувань в лабораторних умовах фізичної моделі запропонованої конструкції косовстановленого відвального робочого органу із лопатевим сферичним метальником для керованого бічного транспортування ґрунту підтверджена її працездатність та з'ясована фізична сутність робочого процесу. Виконані теоретичні дослідження робочого процесу копання ґрунту дозволили отримати математичні моделі для визначення геометричних, кінематичних та силових параметрів робочого органу та розробки методики його інженерного розрахунку.

Ключові слова: землерійно-транспортна машина, косостановлений відвал, лопатевий сферичний метальник, фізична модель, теоретичні дослідження, параметри робочого процесу.

RESEARCH OF WORKING PROCESS OF SLANTING DUMP WORKING ORGAN WITH A BLADE SPHERICAL THROWER FOR THE GUIDED LATERAL PORTAGE OF SOIL

ABSTRACT. *Raising of problem. At the production of earthmovings one of determinatives of choice of earthmovers for their implementation are geometrical sizes, form and volumes of earthen building. Among them extensive objects are widespread as embankments and washtubs for and railway highways, reclamative channels, and also earthmovings on moving away of superficial layers of black earth, reverse filling up of trenches, building of defensive objects. Also operating works on winter maintenance of highways are characterized by an extent. Implementation of the indicated works in most cases requires transferring of soil from backlogs in earthen building at erection of embankment, reverse filling up or vice versa at building of channels, ditches, layer cutting away of soil with his moving away. It is known that considerably the use of earth-moving-transport machines of continuous action allows to promote the productivity of implementation of earthmovings in these cases to the serial standards of that bulldozers behave from by a by a braid dump, motor-graders, грейдер-элеваторы. They are able to provide cutting away of soil and his lateral moving. However a substantial lack of earth-moving-transport machines with by a braid dump is impossibility of portage of soil on considerable distance for his limits. Distance of lateral portage of soil of грейдер-элеватором is limited long conveyer. The increase of distance and height of landfilling creates the necessity of increase of overall sizes and weight of machine from lengthening of conveyer, that does a machine heavy, bulky, unturning and ineffective. One of directions of improvement of machines for earthmovings introduction of intensifiers allowing to increase the productivity and distance of lateral portage of soil. Therefore an increase of efficiency of dump working organs due to introduction of intensifiers for the increase of distance and change of direction of lateral portage of soil is the issue of the day. The purpose of the article. Increase of efficiency of the guided lateral portage of soil by a braid dump due to the use of blade spherical thrower. Conclusion. By the results of tests in the laboratory terms of physical model of the offered construction of косоустановленного of dump working organ with a blade spherical thrower for the guided lateral portage her capacity is confirmed and physical essence of working process is set. The executed theoretical researches of working process of digging of soil allowed to get mathematical models for determination of geometrical, kinematics and power parameters of working organ and development of methodology his engineer calculation.*

Keywords: earth-moving-transport machine, slanting dump, paddle spherical thrower, physical model, theoretical researches, parameters of working process.

1. Постановка проблеми. При виробництві земляних робіт одним із вирішальних факторів вибору машин для їх виконання є геометричні розміри, форма та об'єми земляних споруд. Серед них розповсюджені протяжні споруди у вигляді насипів та корит для автомобільних та залізничних доріг, меліоративні канали, а також земляні роботи по відділенню поверхневих шарів чорнозему, зворотної засипки траншей, будівництва оборонних об'єктів.

Основним видом робіт при будівництві доріг, що потребують виконання значної частини усіх земляних робіт, є зведення насипів та розробка виїмок. Земляне полотно автомобільної дороги, яке прокладається у рівній або пагорбній місцевості, при висоті насипу до 1,5 м зводиться з використанням ґрунту з неглибоких виїмок, що розташовані вздовж дороги. При такій організації робіт ґрунт переміщується у напрямі перпендикулярному до траси дороги на порівняно невеликі відстані – 25 м. Спорудження каналів при гідротехнічному будівництві виконуються переважно у виїмках з поперечним переміщенням ґрунту. Відстань переміщення ґрунту при цьому залежить від розмірів каналу. Вказані види земляних робіт мають великі об'єми і їх ефективно виконання можливе в першу чергу за рахунок машин безперервної дії. Прикладом створення машини безперервної дії для бічного транспортування ґрунту є оснащення бульдозера косостановленим відвалом. Однак, суттєвим недоліком даного робочого обладнання є неможливість транспортування ґрунту на значну відстань за його межі. Аналогічно і конструкція робочого обладнання автогрейдера хоч і дозволяє висувати косостановлений відвал за межі базової машини, але не забезпечує ефективно бічне транспортування ґрунту. Відстань бічного транспортування ґрунту грейдер-елеватором обмежується довжиною конвеєра. Збільшення цього параметру впливає на зростання матеріалоемності машини і енергоемності робочого процесу, на стійкість.

Усунути вказаний недолік дозволяє застосування у робочому обладнанні землерийно-транспортних машин ефективних транспортувальних пристроїв для зовнішнього транспортування ґрунту.

2. Аналіз останніх досліджень та публікацій. Один із напрямів удосконалення робочого обладнання машини для земляних робіт – інтенсифікація їх робочих процесів. Сучасні відомі технічні рішення інтенсифікаторів використовують механічні коливання, ультразвук, вибухові та ударні ефекти, змащення поверхонь тертя ґрунту стислим повітрям [1-3]. Але через складності їх конструктивної реалізації, виникнення додаткових динамічних навантажень на робоче обладнання, необхідність установа додаткового силового обладнання вони не отримали широкого впровадження [4,5]. Наразі більше ефективно застосування на землерийно-транспортних машинах механічних інтенсифікаторів переважно у вигляді додаткових транспортувальних пристроїв для завантаження ковша скрепера [6], збільшення об'єму призьми волочіння у машинах із відвальним робочим органом [7], збільшення відстані бічного транспортування ґрунту землерийно-транспортними машинами безперервної дії [8-10].

3. Мета роботи. Підвищення ефективності виконання земляних робіт землерийно-транспортними машинами з відвальними робочими органами за рахунок впровадження ефективних транспортувальних пристроїв для збільшення відстані та зміни напрямку бічного транспортування ґрунту.

4. Матеріали та методи. Запропоноване робоче обладнання бульдозера (рис. 1) з косоствановленим відвалом 1 та сферичним лопатевим метальником 2 з підшипниковою опорою 3 з приводом у вигляді редуктора 4 та гідродвигуна 5. На опорі 3 жорстко закріплена вертикальна стійка 6, яка за допомогою шарніра 7 з'єднана з кронштейном 8 на відвалі 1. Вертикальна вісь шарніра 7 проходить через центр сферичного лопатевого метальника 2. Вертикальна стійка 6 має гідропривід повороту у вигляді гідроциліндру 9.

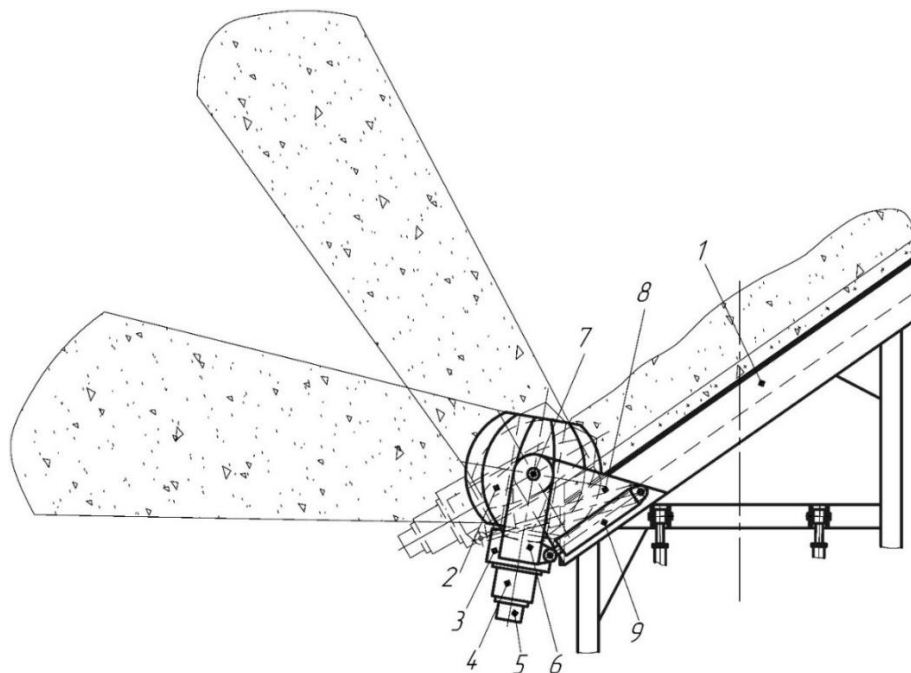


Рис. 1. Косовстановлений відвальний робочий орган із лопатевим сферичним метальником для керованого бічного транспортування ґрунту

Fig. 1. Obliquely installed dumper working body with a bladed spherical thrower for controlled lateral transportation of soil

Під час роботи обладнання ґрунт, що зрізується, підіймається по відвальній поверхні вгору і одночасно з цим рухається вздовж відвалу 1 в бік метальника 2. Після досягнення ґру-

нтом метальника 2, він захоплюється його лопатями та метастється у напрямі перпендикулярному до вісі обертання. Застосування сферичного лопатевого метальника 2 дозволяє змінювати кут напряду метання. Для цього за допомогою гідроциліндру 9 здійснюється сумісний поворот вертикальної стійки 6 та метальника 2 навколо шарніра 7. Сферична форма метальника 2 забезпечує мінімальний просвіт між криволінійною поверхнею відвала 1 і лопатями метальника 2.

Для підтвердження працездатності запропонованої конструкції виготовлено фізичну модель косовстановленого відвала із сферичним лопатевим метальником у масштабі 1:5 відносно натурного зразка косо встановленого відвала, що використовується на базовому тракторі тягового класу 10 кН (рис. 2). Модель випробували на лабораторному стенді для дослідження робочого обладнання землерийно-транспортних машин кафедри будівельних та дорожніх машин ДВНЗ «ПДАБА». Копання ґрунту моделлю підтвердило працездатність запропонованого технічного рішення, встановлені такі особливості робочого процесу:

- різання ґрунту здійснюється повною довжиною різального ножа під кутом до напряду руху робочого обладнання з постійною товщиною;

- висоту призми волочіння поступово збільшується у напрямі переміщення ґрунту вздовж відвала;

- існує режим роботи при якому ґрунт, що копається відвалом, повністю транспортується сферичним лопатевим метальником із змінним напрямком метання.

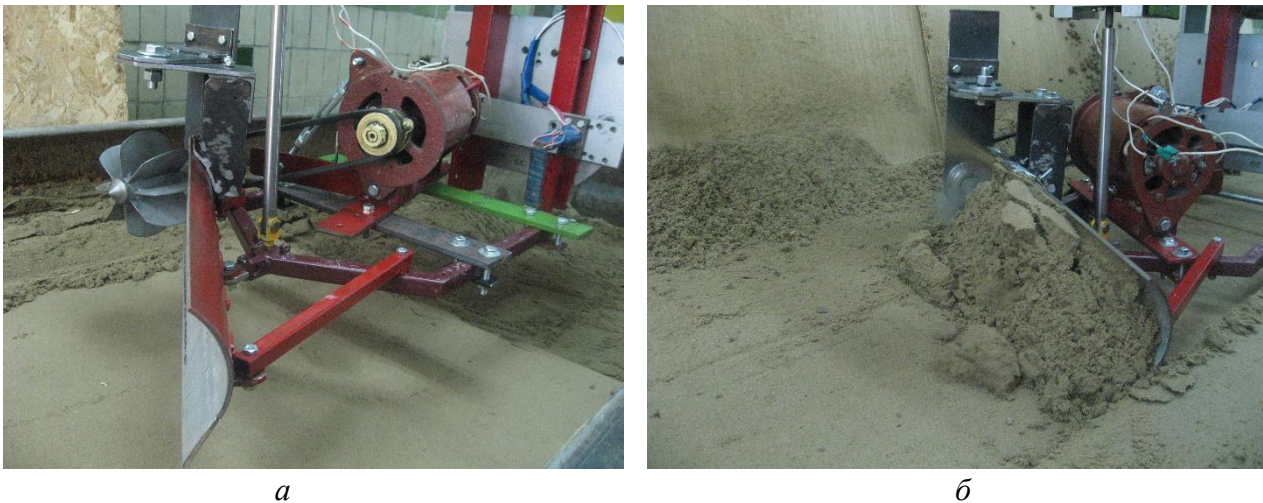


Рис. 2. Фізична модель косовстановленого відвала із сферичним лопатевим метальником:

а – фізична модель; б – робочий процес копання ґрунту

Fig. 2. Physical model of an oblique dump with a spherical blade thrower:

a – physical model; b - work process of soil digging

На підставі теоретичних досліджень отримано математичну модель для визначення горизонтальної складової опору копанню ґрунту косовстановленим відвалом із сферичним метальником у напрямі руху робочого обладнання. Застосовано математичні моделі для визначення складових опору копанню, що отримані на підставі теорії граничного стану ґрунту [4].

5. Результати. Кінцева математична модель для визначення горизонтальної складової опору копанню ґрунту косовстановленим відвалом із сферичним метальником з урахуванням опору різання ґрунту, опору призми волочіння та горизонтальної складової опору підйому пласта по відвальній поверхні має вигляд:

$$W_K = \left(\sin \varphi_{zx} + tg\delta \cdot \sqrt{\frac{1}{\sin^2 \alpha_p} - \sin^2 \varphi_{zx}} \right) \cdot A_1 \cdot L \cdot h \cdot \left[\frac{\gamma \cdot g \cdot h}{2} + C_W \cdot ctg\rho + \frac{\sin \alpha_p}{K_\psi \cdot h} \times \right.$$

$$\begin{aligned}
 & \times (tg\delta + tg\rho) \cdot \gamma_p \cdot g \cdot \cos^2 \rho \cdot H_{cp}^2 \cdot K \cdot \arcsin \frac{1}{2 \cdot K} \cdot \left(1 + tg\delta \cdot \arcsin \frac{1}{2 \cdot K} \right) + \gamma_p \cdot g \cdot H_{cp} \Big] + \\
 & + \gamma_p \cdot g \cdot \cos^2 \rho \cdot \frac{(L - B_M) \cdot H_{cp}^2}{2} + \gamma_p \cdot g \cdot \cos \varphi_{zx} \cdot \cos \alpha_p \cdot \cos^2 \rho \cdot H_{cp}^2 \cdot (L - B_M) \times \\
 & \times \left[(tg\rho + tg\delta) \cdot H_{cp} \cdot K \arcsin \frac{1}{2 \cdot K} \cdot \left(1 + tg\delta \cdot \arcsin \frac{1}{2 \cdot K} \right) + K_\psi \cdot h \right], \quad (1)
 \end{aligned}$$

де φ_{zx} - кут захвата відвала; α_p - кут різання ґрунту; δ - кут зовнішнього тертя ґрунту; ρ - кут внутрішнього тертя ґрунту; L - довжина різального ножа; h - глибина різання ґрунту; C_W - зчеплення ґрунту; γ - густина суцільного ґрунту; γ_p - густина розпушеного ґрунту; B_M - ширина металника; H_{cp} - середня висота призми волочіння; A_1 - коефіцієнт, який визначається аналітично в залежності від кута різання ґрунту α_p .

Значення коефіцієнтів дорівнюють

$$K_\psi = \frac{tg\alpha_p + tg\psi}{tg\alpha_p \cdot tg\psi}; \quad K = \frac{R}{H_e},$$

де $\psi = \frac{\pi}{4} - \frac{\rho}{2}$ - кут зсуву; R - радіус кривизни лобової поверхні відвала; H_e - висота відвала.

Середня висота призми волочіння

$$H_{cp} = \sqrt{0,5 \cdot h \cdot (L - B_M) \cdot tg\rho}. \quad (2)$$

Розрахункова схема для визначення геометричних параметрів процесу транспортування ґрунту косовстановленим відвалом з металником надана на рисунку 3.

Кут взаємодії металника із ґрунтом дорівнює

$$\begin{aligned}
 \alpha_0 = \pi - \rho + \arctg \frac{H_{\max} - R}{R} - \arctg \left[\left(1 - \frac{H_{\max}}{R} \right) \cdot \cos \rho + \right. \\
 \left. + \sin \rho \cdot \cos \left(\arctg \frac{H_{\max} - R}{R} \right) \right]. \quad (3)
 \end{aligned}$$

Кутові параметри взаємодії металника з ґрунтом дорівнюють

$$\begin{aligned}
 \beta_1 &= \arctg \frac{H_{\max} - R}{R}; \\
 \theta &= \arcsin \left[\left(1 - \frac{H_{\max}}{R} \right) \cdot \cos \rho + \cos \beta_1 \cdot \sin \rho \right]; \\
 \beta_2 &= \frac{\pi}{2} - (\theta + \rho); \\
 \alpha_0 &= \frac{\pi}{2} + \beta_1 + \beta_2.
 \end{aligned}$$

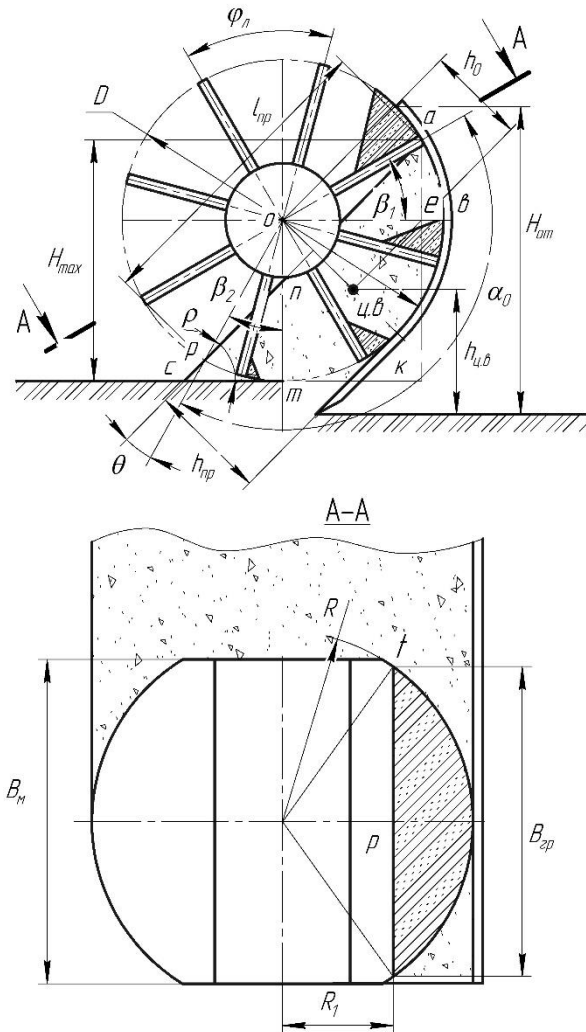


Рис.3. Розрахункова схема для визначення геометричних параметрів процесу транспортування ґрунту косовстановленим відвалом із сферичним лопатевим метальником

Fig. 3. The calculation scheme for determining the geometric parameters of the soil transportation process with an oblique dump with a spherical blade thrower

Довжина межі вільної поверхні призми волочіння, що знаходиться у взаємодії з метальником дорівнює

$$l_{np} = H_{\max} \cdot ctg\rho - \frac{H_{\max} - R \cdot \cos\beta_1 \cdot tg\rho}{\sin\rho} + \frac{R \cdot \sin\beta_2}{\cos\rho} \quad (4)$$

Висота

$$h_{np} = R - 0,5\sqrt{4R^2 - l_{np}^2} \quad (5)$$

Площа поперечного перерізу призми волочіння, що захоплюється метальником

$$F_{np} = 0,5\left[R^2 \cdot \alpha_0 + l_{np} \cdot (R - h_{np})\right] \quad (6)$$

Відстань між віссю обертання метальника та центром ваги поперечного перерізу призми волочіння

$$h_0 = \frac{l_{np}^2}{12F_{np}} \quad (7)$$

Висота розташування центра ваги ґрунту у призмі волочіння, що потрапляє на металеньник

$$h_{цв} = R - h_0 \cdot \cos(0,5\alpha_0 - \beta_2). \quad (8)$$

Об'єм ґрунту, що знаходиться на лопаті металеньника при взаємодії її з призмою волочіння, складається з двох частин

$$V_L = V_1 + V_2, \quad (9)$$

де V_1 - об'єм ґрунту, що потрапляє на лопать з призми волочіння при її повороті на кут транспортування α_0 ; V_2 - об'єм ґрунту, що потрапляє на лопать безпосередньо з різального ножа відвала по ширині металеньника.

Для розрахунку V_1 потрібно врахувати, що лопаті металеньника при обертанні зрізують ґрунт призми волочіння, яка рухається вздовж відвальної поверхні. У зв'язку з цією особливістю, ширина стружки, що зрізується бічною стороною лопаті з призми волочіння, дорівнює шляху, який проходить ґрунт призми волочіння за проміжок часу $t_L = \varphi_L / \omega_0$, де φ_L - кутовий крок встановлення лопатей металеньника; ω_0 - кутова швидкість обертання металеньника. Тому, шлях ґрунту за час t_L дорівнює ширині стружки S , а саме

$$S = V_g \cdot \frac{\varphi_L}{\omega_0}, \quad (10)$$

де V_g - швидкість переміщення ґрунту вздовж лобової поверхні косовстановленого відвала

$$V_g = V_{\bar{b}M} \cdot \sin \varphi_{zx}, \quad (11)$$

де $V_{\bar{b}M}$ - швидкість переміщення базової машини.

З врахуванням виразів (6), (10), (11) об'єм V_1 дорівнює

$$V_1 = F_{np} \cdot V_{\bar{b}M} \cdot \sin \varphi_{zx} \cdot \frac{\varphi_L}{\omega_0}. \quad (12)$$

При визначенні об'єму V_2 вважаємо, що він потрапляє на лопать із зони різання ґрунту за час t_L і тому буде дорівнювати

$$V_2 = B_M \cdot h \cdot V_{\bar{b}M} \cdot \sin \varphi_{zx} \cdot \frac{\varphi_L}{\omega_0}. \quad (13)$$

Загальний об'єм ґрунту на лопаті на початку процесу метання

$$V_L = (F_{np} \cdot \sin \varphi_{zx} + B_M \cdot h) \cdot V_{\bar{b}M} \cdot \frac{\varphi_L}{\omega_0}. \quad (14)$$

Розрахункова схема визначення геометричних параметрів об'єму ґрунту на лопаті на початку метання металеньником надана на рисунку 4.

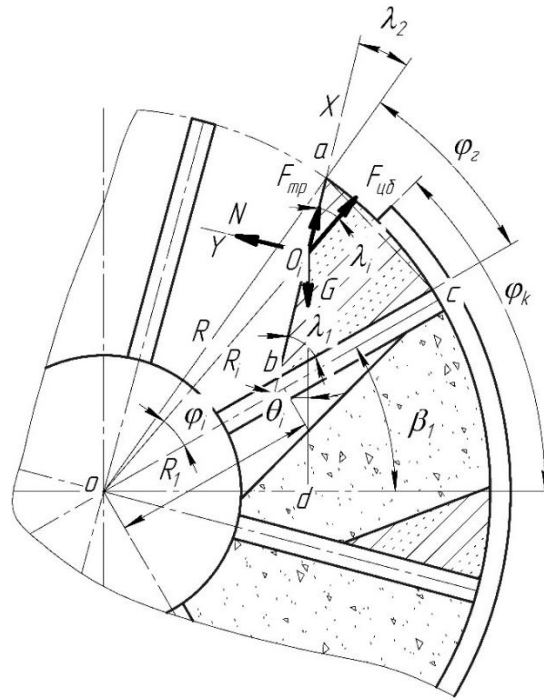


Рис.4. Розрахункова схема визначення геометричних параметрів об'єму ґрунту на лопаті на початку метання

Fig. 4. Calculation scheme for determining geometric parameters of the volume of soil on the shovel at the beginning of throwing

Розглянемо умову рівноваги частки ґрунту на вільній поверхні максимального об'єму ґрунту на лопаті, яка знаходиться від вісі обертання на відстані R_i під кутом φ_i до поверхні лопаті.

Рівняння рівноваги в координатних осях XU мають наступний вигляд

$$\begin{cases} \sum F_x = 0; F_{тр} + F_{цб} \cdot \cos \lambda_i - G \cdot \cos \theta_i = 0, \\ \sum F_y = 0; N - F_{цб} \cdot \sin \lambda_i - G \cdot \sin \theta_i = 0, \end{cases} \quad (15)$$

де $F_{цб} = m \cdot \omega_0^2 \cdot R_i$ - відцентрова сила, що діє на частку ґрунту; $G = m \cdot g$ - вага частки; $F_{тр} = N \cdot \text{tg} \rho$ - сила тертя частки по вільній поверхні ґрунту; λ_i, θ_i - кути, що визначають положення векторів G та $F_{цб}$.

Після перетворень системи рівнянь (15) можна отримати рівність

$$\frac{\omega_0^2 \cdot R_i}{g} = \frac{\cos(\theta_i + \rho)}{\cos(\lambda_i - \rho)}. \quad (16)$$

З врахуванням того, що кут $\theta_i = \frac{\pi}{2} - (\beta_1 + \varphi_i + \lambda_1)$ рівність (16) має вигляд

$$\frac{\omega_0^2 \cdot R_i}{g} = \text{tg}(\lambda_i - \rho) \cdot \cos(\beta_1 + \varphi_i) + \sin(\beta_1 + \varphi_i). \quad (17)$$

При $R_i = R_1$ та $\varphi_i = 0$ вираз (17) має наступний вигляд

$$\omega_0^2 \cdot R_1 / g = \text{tg}(\lambda_1 - \rho) \cdot \cos \beta_1 + \sin \beta_1. \quad (18)$$

Звідки кут λ_1 дорівнює

$$\lambda_1 = \arctg\left(\frac{\omega_0^2 \cdot R_1}{g \cdot \cos\beta_1} - \operatorname{tg}\beta_1\right) + \rho. \quad (19)$$

При $R_i = R$ та $\varphi_i = \varphi_2$ вираз (17) має наступний вигляд

$$\frac{\omega_0^2 \cdot R}{g} = \operatorname{tg}(\lambda_2 - \rho) \cdot \cos(\beta_1 + \varphi_2) + \sin(\beta_1 + \varphi_2) \quad (20)$$

З виразу (20) значення кута λ_2 дорівнює

$$\lambda_2 = \arctg\left[\frac{\omega_0^2 \cdot R}{g \cdot \cos(\beta_1 + \varphi_2)} - \operatorname{tg}(\beta_1 + \varphi_2)\right] + \rho. \quad (21)$$

Із трикутника *oab* $\varphi_2 = \lambda_1 - \lambda_2$ і тоді з врахуванням формул (19) та (21) кут φ_2 дорівнює

$$\varphi_2 = \arctg\left(\frac{\omega_0^2 \cdot R_1}{g \cdot \cos\beta_1} - \operatorname{tg}\beta_1\right) - \arctg\left[\frac{\omega_0^2 \cdot R}{g \cdot \cos(\beta_1 + \varphi_2)} - \operatorname{tg}(\beta_1 + \varphi_2)\right]. \quad (22)$$

Площа радіального перерізу об'єму ґрунту на лопаті з трикутника *abc*

$$F = 0,5R \cdot (R - R_1) \cdot \sin \varphi_2 \quad (23)$$

і звідки

$$\varphi_2 = \arcsin \frac{2 \cdot F}{R \cdot (R - R_1)}. \quad (24)$$

З іншого боку площу F можна виразити через об'єм ґрунту V_L на лопаті за формулою (14) та ширини ґрунту на лопаті B_{2p} (рис. 3).

$$F = \frac{3 \cdot V_L}{B_{2p}}. \quad (25)$$

З врахуванням (23) кут φ_2 дорівнює

$$\varphi_2 = \arcsin \frac{3 \cdot V_L}{0,5 \cdot B_{2p} \cdot R \cdot (R - R_1)} = f(R_1). \quad (26)$$

Таким чином залежності (23) і (26) утворюють наступну систему рівнянь для визначення відстані R_1

$$\begin{cases} \varphi_r = \arcsin \frac{3 \cdot V_L}{0,5 \cdot B_{rp} \cdot R \cdot (R - R_1)}; \\ \varphi_r = \arctg\left(\frac{\omega_0^2 \cdot R_1}{g \cdot \cos\beta_1} - \operatorname{tg}\beta_1\right) - \arctg\left[\frac{\omega_0^2 \cdot R}{g \cdot \cos(\beta_1 + \varphi_r)} - \operatorname{tg}(\beta_1 + \varphi_r)\right] \end{cases} \quad (27)$$

Розрахункова схема визначення кута розвантаження надана на рисунку 5. Після виходу об'єму ґрунту, що знаходиться на лопаті із взаємодії з захисним кожухом починається його

рух вздовж лопаті під дією відцентрової сили $F_{ев}$ (рис. 5, а). Після повороту лопаті на кут розвантаження α_p об'єм ґрунту повністю сходить з поверхні лопаті (рис. 5, б). Величина абсолютних швидкостей кінцевих точок b та c площі поперечного перерізу ґрунту складаються з векторів радіальних швидкостей V_0, V_{01} перпендикулярних до поверхні лопаті та вектора V_L швидкості ґрунту вздовж лопаті.

Відстань між віссю обертання металника та центром ваги об'єму ґрунту вздовж лопаті

$$R_{1c} = R_1 + \frac{2}{3} \cdot (R - R_1). \quad (28)$$

Висота

$$a_c = \frac{R \cdot \sin \varphi_2}{3}. \quad (29)$$

Радіальна координата центра ваги

$$R_c = \sqrt{R_{1c}^2 + a_c^2}. \quad (30)$$

Кутова координата центра ваги

$$\alpha_c = \arcsin \frac{a_c}{R_c}. \quad (31)$$

Рівняння руху маси m ґрунту вздовж лопаті у напрямі X має вигляд

$$m\ddot{x} = m \cdot \omega_0^2 \cdot R_c \cdot \cos \alpha_{cm} - mg \cdot \sin \varphi_k + N \cdot tg\delta = 0. \quad (32)$$

Реакція на ґрунт з боку лопаті

$$N = mg \cdot \cos \varphi_k - m \cdot \omega_0^2 \cdot R_c \cdot \sin \alpha_{cm}. \quad (33)$$

Після перетворення маємо

$$\ddot{x} = \frac{\omega_0^2 \cdot R_c}{\cos \delta} \cdot [\cos(\delta - \alpha_{cm}) - g \cdot \sin(\varphi_k + \delta)]. \quad (34)$$

Враховуючи, що $\ddot{x} = d\dot{x}/dt$ можна записати вираз (34) у вигляді

$$d\dot{x} = \frac{\omega_0^2 \cdot R_c}{\cos \delta} \cdot [\cos(\delta - \alpha_{cm}) - g \cdot \sin(\varphi_k + \delta)] \cdot dt. \quad (35)$$

Після інтегрування

$$\dot{x} = \frac{\omega_0^2 \cdot R_c}{\cos \delta} \cdot [\cos(\delta - \alpha_{cm}) - g \cdot \sin(\varphi_k + \delta)] \cdot t + C_1. \quad (36)$$

При початкових умовах $t = 0, \dot{x} = 0, C_1 = 0$.

Далі після інтегрування виразу (36) отримаємо

$$x = \frac{\omega_0^2 \cdot R_c}{\cos \delta} \cdot [\cos(\delta - \alpha_{cm}) - g \cdot \sin(\varphi_k + \delta)] \cdot \frac{t^2}{2} + C_2. \quad (37)$$

При початкових умовах $t = 0, x = 0, C_2 = 0$.

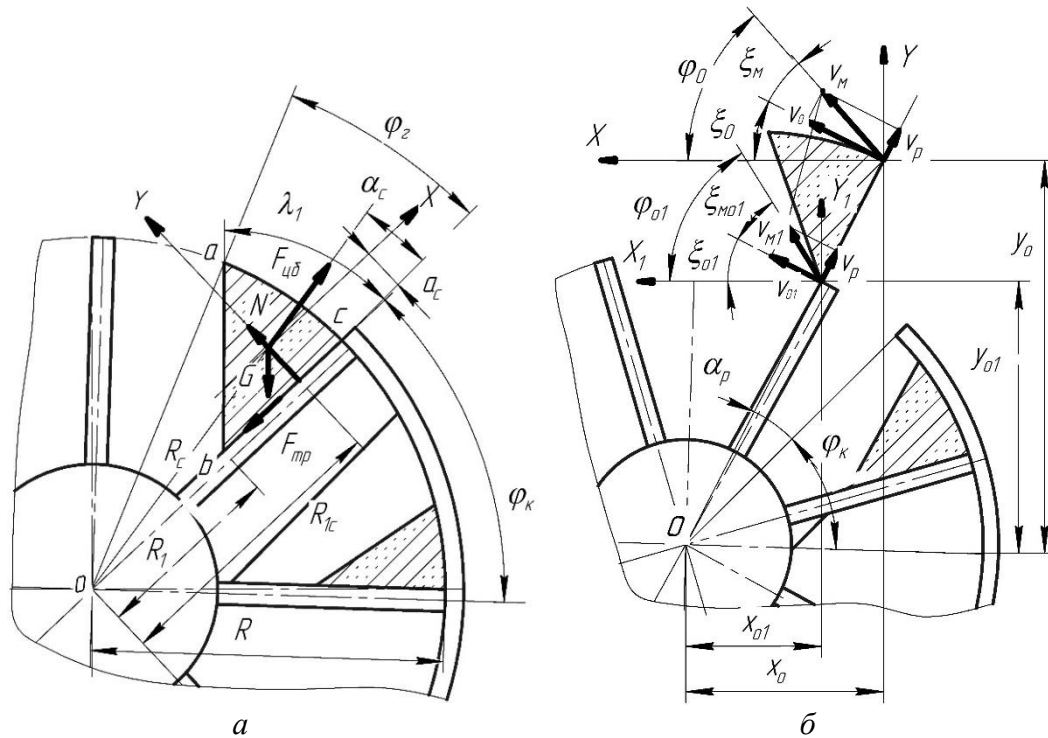


Рис. 5. Розрахункова схема визначення кута розвантаження лопатей метальника та початкових швидкостей метання:

а – початок сходу ґрунту з лопаті; б – кінець сходу ґрунту з лопаті

Fig. 5. Calculation scheme for determining the unloading angle of the thrower's blades and initial throwing speeds:

a – the beginning of soil emergence from the blade; b - the end of soil emergence from the shovel

За час розвантаження t_p ґрунт переміщується по лопаті на відстань $R - R_1$ і при цих значеннях вираз (37) має вигляд

$$R - R_1 = \frac{\omega_0^2 \cdot R_c}{\cos \delta} \cdot [\cos(\delta - \alpha_{cm}) - g \cdot \sin(\varphi_k + \delta)] \cdot \frac{t_p^2}{2}. \quad (38)$$

Звідси час розвантаження t_p дорівнює

$$t_p = \sqrt{\frac{2 \cdot (R - R_1) \cdot \cos \delta}{\omega_0^2 \cdot R_c \cdot [\cos(\delta - \alpha_{cm}) - g \cdot \sin(\varphi_k + \delta)]}}. \quad (39)$$

Швидкість ґрунту в кінці розвантаження V_p

$$V_p = \sqrt{2 \cdot (R - R_1) \cdot R_c \cdot \omega_0^2 \cdot \cos \delta \cdot [\cos(\delta - \alpha_{cm}) - g \cdot \sin(\varphi_k + \delta)]}. \quad (40)$$

Кут розвантаження метальника

$$\alpha_p = \omega_0 \cdot t_p. \quad (41)$$

Радіальні швидкості відповідно дорівнюють $V_{01} = \omega_0 \cdot R$, $V = \omega_0 \cdot (2 \cdot R - R_1)$, а їх кути нахилу $\xi_0 = \xi_{01} = 90^\circ - (\alpha_p + \varphi_k)$.

Кути $\xi_m = \arctg \frac{V_p}{V_0}$; $\xi_{m01} = \arctg \frac{V_p}{V_{01}}$; $\varphi_0 = \xi_0 + \xi_m$; $\varphi_{01} = \xi_{01} + \xi_{m01}$.

Відстані

$$\begin{aligned}x_0 &= (2R - R_1) \cos(\alpha_p + \varphi_k); \\y_0 &= (2R - R_1) \sin(\alpha_p + \varphi_k); \end{aligned} \quad (42)$$

$$\begin{aligned}x_{01} &= R \cdot \cos(\alpha_p + \varphi_k); \\y_{01} &= R \cdot \sin(\alpha_p + \varphi_k). \end{aligned} \quad (43)$$

Рівняння траєкторії руху часток ґрунту кинутого під кутом φ_0 до горизонту із швидкістю V_M в координатних осях XU має вигляд

$$y = x \cdot \operatorname{tg} \varphi_0 - \frac{g \cdot x^2}{2 \cdot V_M^2 \cdot \cos^2 \varphi_0}. \quad (44)$$

Згідно рисунку 6 в координатних осях XU при $x = l_{\max}$; $y = -(y_0 + R)$

$$-(y_0 + R) = l_{\max} \cdot \operatorname{tg} \varphi_0 - \frac{g \cdot l_{\max}^2}{2 \cdot V_M^2 \cdot \cos^2 \varphi_0}. \quad (45)$$

Звідки

$$l_{\max} = V_M \cos \varphi_0 \frac{V_M \sin \varphi_0 + \sqrt{V_M^2 \sin^2 \varphi_0 + 2g(y_0 + R)}}{g}. \quad (46)$$

В координатних осях X_1U_1 при $x = l_{\min}$; $y = -(y_{01} + R)$

$$-(y_{01} + R) = l_{\min} \cdot \operatorname{tg} \varphi_{01} - \frac{g \cdot l_{\min}^2}{2 \cdot V_{M1}^2 \cdot \cos^2 \varphi_{01}}. \quad (47)$$

Звідки

$$l_{\min} = V_{M1} \cos \varphi_{01} \frac{V_{M1} \sin \varphi_{01} + \sqrt{V_{M1}^2 \sin^2 \varphi_{01} + 2g(y_{01} + R)}}{g}. \quad (48)$$

Максимальна та мінімальна відстані метання ґрунту відносно вісі обертання металевика дорівнюють

$$L_{\max} = l_{\max} - x_0; \quad (49)$$

$$L_{\min} = l_{\min} - x_{01}. \quad (50)$$

Максимальна та мінімальні відстані бічного транспортування ґрунту за межі відвала у напрямі перпендикулярному до напрямку руху базової машини (рис. 6) відповідно визначаються залежностями

$$L_{\bar{b}. \min} = L_{\min} \sin \varphi_{zx} - 0,5B_{cp} \cos \varphi_{zx} - b_{ome}; \quad (51)$$

$$L_{\bar{b}. \max} = L_{\max} \sin(\varphi_{zx} + \alpha_M) - 0,5B_{cp} \cos(\varphi_{zx} + \alpha_M) - b_{ome}, \quad (52)$$

де α_M - максимальний кут повороту сферичного металевика навколо вертикальної вісі; b_{ome} - відстань між вертикальною віссю повороту металевика та бічною стороною відвала.

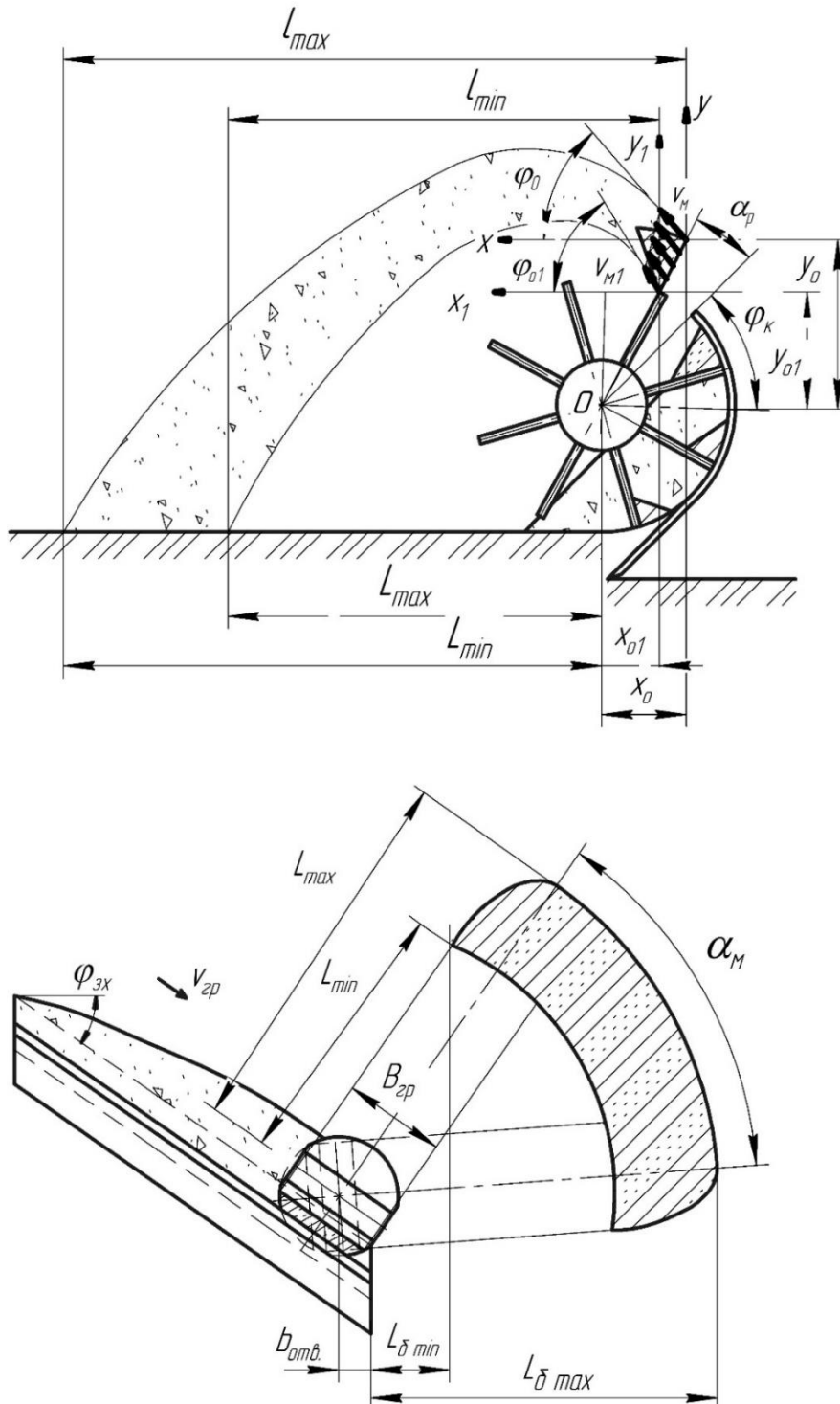


Рис. 6. Розрахункова схема визначення геометричних параметрів процесу метання ґрунту
 Fig. 6. Calculation scheme for determining the geometric parameters of the soil throwing process

Для визначення енергетичних показників робочого процесу розглянемо баланс потужності бульдозерного обладнання, який має вигляд

$$N = N_k + N_n + N_p + N_{mp}, \quad (53)$$

де N_k - потужність на копання ґрунту косовстановленим відвалом, кВт; N_n - потужність на підйом ґрунту, кВт; N_p - потужність на розгін ґрунту, кВт; N_{mp} - потужність на подолання сил тертя по лобовій поверхні відвала при транспортуванні ґрунту металником, кВт.

Витрати потужності на копання ґрунту дорівнюють

$$N_K = \frac{\Pi_m \cdot E_K}{1000}, \quad (54)$$

де Π_m - теоретична продуктивність бульдозерного відвала у цілому, $\Pi_m = L \cdot h \cdot V_{\text{бм}} \cdot \cos \varphi_{\text{зх}}$, м³/с; E_K - енергоємність процесу копання, Н/м².

Витрати потужності на підйом ґрунту містять дві складові

$$N_n = N_1 + N_2, \quad (55)$$

де N_1 - витрати потужності на підйом ґрунту, який подається на металник з призми волочіння; N_2 - витрати потужності на підйом ґрунту, який зрізується різальним ножом відвала по ширині металника B_M .

Потужність N_1 дорівнює

$$N_1 = \frac{\Pi_{m1} \cdot g \cdot \gamma_p \cdot K_p \cdot (H_{\text{max}} - h_{\text{цв}})}{1000}, \quad (56)$$

де $\Pi_{m1} = (L - B_M) \cdot h \cdot V_{\text{бм}} \cdot \cos \varphi_{\text{зх}}$ - продуктивність бульдозерного обладнання по ґрунту, який потрапляє після його різання у призму волочіння; γ_p - густина розпушеного ґрунту; K_p - коефіцієнт розпушення ґрунту.

Потужність N_2 дорівнює

$$N_2 = \frac{\Pi_{m2} \cdot g \cdot \gamma_p \cdot K_p \cdot H_{\text{max}}}{1000}, \quad (57)$$

де $\Pi_{m2} = B_M \cdot h \cdot V_{\text{бм}} \cdot \cos \varphi_{\text{зх}}$ - продуктивність бульдозерного обладнання по ґрунту, який потрапляє після його різання безпосередньо на металник.

Витрати потужності на розгін ґрунту

$$N_p = \Pi_m \cdot \gamma_p \cdot K_p \cdot \frac{\omega_0^2 \cdot R_c^2}{2000}, \quad (58)$$

де R_c - відстань між віссю обертання та центром ваги об'єму ґрунту на лопаті в момент початку метання; ω_0 - кутова швидкість обертання металника.

Для визначення витрат потужності на подолання сил тертя ґрунту по лобовій поверхні відвала, враховуємо, що ґрунт на лопаті металника потрапляє за час t_0 його повороту на кут

$$\alpha_0. \text{ Час } t_0 = \frac{\alpha_0}{\omega_0}.$$

За цей час об'єм ґрунту, який потрапляє на лопаті металника з призми волочіння дорівнює

$$V_{np} = F_{np} \cdot V_{\text{бм}} \cdot t_0 \cdot \sin \varphi_{\text{зх}}. \quad (59)$$

Об'єм ґрунту, що потрапляє на лопаті металника з різального ножа відвала за час t_0 визначається формулою

$$V_{pn} = B_M \cdot h \cdot V_{\text{бм}} \cdot K_p \cdot t_0 \cdot \cos \varphi_{\text{зх}}. \quad (60)$$

Загальна маса ґрунту на лопатях під час транспортування

$$m_{zp} = \gamma_p V_{\bar{b}_m} (F_{np} \sin \varphi_{zx} + B_m h K_p \cos \varphi_{zx}) \frac{\alpha_0}{\omega_0}. \quad (61)$$

Відцентрова сила, що діє на масу m_{zp}

$$F_{вц} = \gamma_p \cdot V_{\bar{b}_m} \cdot \omega_0 \cdot R \cdot \alpha_0 (F_{np} \cdot \sin \varphi_{zx} + B_m \cdot h \cdot K_p \cdot \cos \varphi_{zx}). \quad (62)$$

Сила тертя між ґрунтом на лопатях та лобовою поверхнею відвала

$$F_{mp} = \gamma_p \cdot V_{\bar{b}_m} \cdot \omega_0 \cdot R \cdot \alpha_0 \cdot \operatorname{tg} \delta (F_{np} \cdot \sin \varphi_{zx} + B_m \cdot h \cdot K_p \cdot \cos \varphi_{zx}). \quad (63)$$

Потужність N_{mp} визначається як

$$N_{mp} = \frac{\gamma_p \cdot V_{\bar{b}_m} \cdot \omega_0^2 \cdot R^2 \cdot \alpha_0 \cdot \operatorname{tg} \delta}{1000} (F_{np} \cdot \sin \varphi_{zx} + B_m \cdot h \cdot K_p \cdot \cos \varphi_{zx}). \quad (64)$$

Повна енергоємність робочого процесу, $\text{кВт} \cdot \text{с} / \text{м}^3$

$$E = \frac{N}{L \cdot h \cdot V_{\bar{b}_m} \cdot \cos \varphi_{zx}}. \quad (65)$$

6. Висновки. Результатами випробувань в лабораторних умовах фізичної моделі запропонованої конструкції косовстановленого відвального робочого органа із лопатевим сферичним металником для керованого бічного транспортування ґрунту підтверджена її працездатність та з'ясована фізична сутність робочого процесу.

Виконані теоретичні дослідження робочого процесу копання ґрунту дозволили отримати математичні моделі для визначення геометричних, кінематичних та силових параметрів робочого органа та розробки методики його інженерного розрахунку.

Список використаних джерел:

1. Хмара Л. А., Кравець С. В., Скоблюк М. П. та ін. (2014) *Машини для земляних робіт: Підручник*. Харків: ХНАДУ. – 548 с.
2. Баловнев В. И., Хмара Л. А. (1983) *Интенсификация земляных работ в дорожном строительстве*. М.: Транспорт, 384 с.
3. Хмара Л. А., Колісник М. П., Станевський В. П. (1992) *Модернізація та підвищення продуктивності будівельних машин*. К.: Будівельник, 152 с.
4. Баловнев В. И., Хмара Л. А. (1993) *Интенсификация разработки грунтов в дорожном строительстве*. – М.: Транспорт, 383 с.
5. Деревянчук М. И. (2000) Анализ баланса мощности радиального роторно-лопастного метателя ґрунта для заполнения ковша скрепера // *Сборник научных трудов ПГАСА «Интенсификация рабочих процессов строительных и дорожных машин»*. Выпуск 10. Подъемно-транспортные, строительные и дорожные машины и оборудование. – Днепропетровск. – С. 54-63.
6. Голубченко О. І., Хожило М.Е. (2008) Тенденції вдосконалення конструкції відвальних робочих органів для збільшення об'єму призьми волочіння. *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури*. – № 6-7. – С. 42 – 46.
7. Голубченко О. І., Хожило М.Е. (2009) Розробка робочого обладнання землерийно-транспортної машини безперервної дії. *Строительство. Материаловедение. Машиностроение. Серия: Подъемно-транспортные, строительные и дорожные машины и оборудование*. – Вып. 51.– С. 110-113.
8. Голубченко О. І., Хожило М.Е. (2010) Кінематичні особливості процесу транспортування ґрунту гвинтовим робочим органом різально-кидального типу для землерийно-транспортних машин безперервної дії. *Строительство. Материаловедение. Машиностроение. Серия: Подъемно-транспортные, строительные и дорожные машины и оборудование*. – Вып. 57.– С. 36-45.

9. Голубченко О. І. Хожило М.Е. (2011) Огляд та пропозиції конструкцій активного робочого обладнання землерийно-транспортних машин безперервної дії. Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури. – № 6-7. – С. 48 – 55.
10. Голубченко О. І. (2012) Конструкції та застосування різально-метальних органів для інтенсифікації робочих процесів землерийно-транспортних машин. Строительство. Материаловедение. Машиностроение. Серия: Подъемно-транспортные, строительные и дорожные машины и оборудование. – Вып. 66.– С.296-302.

References

1. Hmara, L.A., Kravets, S.V., Skoblyuk, M.P. (2014). *Mashini dlya zemlyanikh robot: Pidruchnik [Machines for earthmovings: Textbook]*. Harkiv: HNADU. - (in Ukrainian)
2. Balovnev, V.I., Khmara, L.A. (1983). *Intensifikatsiya zemlyanykh rabot v dorozhnom stroitelstve [Intensification of earthmovings is in travelling building]*. Moscow: Transport. - (in Russian)
3. Khmara, L.A., Kolisnik, M.P., Stanevskiy, V.P. (1992). *Modernizatsiya ta pidvishchennya produktivnosti budivelnykh mashin [Modernisation and increase of the productivity of building machines]*. Kyiv: Budivelnik. - (in Ukrainian)
4. Balovnev, V. I., Khmara, L. A. (1993). *Intensifikatsiya razrabotki gruntov v dorozhnom stroitelstve [Intensification of development of soils is in travelling building]*. Moscow: Transport. - (in Russian)
5. Derevyanchuk, M. I. (2000). Analiz balansu moschnosti radialnogo rotorno-lopastnogo metatelya grunta dlya zapolneniya kovsha skrepera [Statement of power of radial rotor-blade thrower of soil analysis for filling of scoop of dragshovel]. *Sbornik nauchnykh trudov PGASA «Intensifikatsiya rabochih protsessov stroitelnykh i dorozhnykh mashin». Vyipusk 10. Pod'emno-transportnyie, stroitelnyie i dorozhnyie mashiny i oborudovanie [Collected scientific works of the PGAAS "Intensification of the working processes of construction and road machines". Hoisting-and-transport, construction and road machinery and equipment], Issue 10, 54-63.* - (in Russian)
6. Golubchenko, O.I., Hozhilo, M.E. (2008). Tendentsiyi vdoskonalennya konstruktsiyi vidvalnykh robochih organiv dlya zbilshennya ob'emnu prizmi volochinnya [Tendencies of perfection of construction of dump working organs are for the increase of volume of prism of dragging]. *Visnik Pridniprovskoyi derzhavnoyi akademiyi budivnitstva ta arhitekturi [News of Pridniprovsk State Power Academy of Architecture and Architecture], 6-7, 42 – 46.* - (in Ukrainian)
7. Golubchenko, O.I., Hozhilo, M.E. (2009). Rozrobka robochogo obladdannya zemleriyno-transportnoyi mashini bezperervnoyi diyi [Development of working equipment of an earth-moving-transport machine of continuous action]. *Stroitelstvo. Materialovedenie. Mashinostroenie. Seriya: Pod'emno-transportnyie, stroitelnyie i dorozhnyie mashiny i oborudovanie [Building. Materials Science. Mechanical engineering. Series: Hoisting-and-transport, construction and road machinery and equipment], 51, 110-113.* - (in Ukrainian)
8. Golubchenko, O.I., Hozhilo, M.E. (2010). Kinematichni osoblivosti protsesu transportuvannya gruntu gvintovim robochim organom rizalno-kidalnogo tipu dlya zemleriyno-transportnykh mashin bezperervnoyi diyi [Kinematics features of process of transporting of soil by the spiral working organ of cutting-missile type for earth-moving-transport machines of continuous action]. *Stroitelstvo. Materialovedenie. Mashinostroenie. Seriya: Pod'emno-transportnyie, stroitelnyie i dorozhnyie mashiny i oborudovanie [Building. Materials Science. Mechanical engineering. Series: Hoisting-and-transport, construction and road machinery and equipment], 57, 36-45.* - (in Ukrainian)
9. Golubchenko, O.I., Hozhilo, M.E. (2011). Oglyad ta propozitsiyi konstruktsiy aktivnogo robochogo obladdannya zemleriyno-transportnykh mashin bezperervnoyi diyi [Review and suggestions of constructions of active working equipment of earth-moving-transport machines of continuous action]. *Visnik Pridniprovskoyi derzhavnoyi akademiyi budivnitstva ta arhitekturi [News of Pridniprovsk State Power Academy of Architecture and Architecture], 6-7, 48 – 55.* - (in Ukrainian)
10. Golubchenko, O.I. (2012). Konstruktsiyi ta zastosuvannya rizalno-metalnykh organiv dlya intensifikatsiyi robochih protsesiv zemleriyno-transportnykh mashin [Constructions and applications of cutting-missile organs are for intensification of working processes of earth-moving-transport machines]. *Stroitelstvo. Materialovedenie. Mashinostroenie. Seriya: Pod'emno-transportnyie, stroitelnyie i dorozhnyie mashiny i oborudovanie [Building. Materials Science. Mechanical engineering. Series: Hoisting-and-transport, construction and road machinery and equipment], 66, 296-302.* - (in Ukrainian)