

ТЕОРЕТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ КОПАННЯ ҐРУНТУ БУЛЬДОЗЕРОМ,
ОБЛАДНАНИМ ШНЕКОВИМ ІНТЕНСИФІКАТОРОМ

Л. А. Хмара, д. т. н., проф., Р. М. Кроль, асист.

Ключові слова: бульдозер, шнековий інтенсифікатор, робоче обладнання, бічне транспортування, критична кутова швидкість, гранична площа, поперечний переріз

Постановка проблеми. Бічне транспортування ґрунту при плануванні будівельних ділянок та прокладанні земляного полотна під час будівництва автодоріг є однією із трудомістких операцій, для цього використовують бульдозери з неповоротними та поворотними відвалами, автогрейдери та грейдер-елеватори. Незважаючи на такі переваги бульдозерів як універсальність, простота конструкції та маневреність, використання цих машин під час виконання зазначених технологічних операцій має свої недоліки: при збільшенні товщини вирізуваної стружки бічна складова опору копанню намагається розвернути бульдозер навколо повздовжньої осі, що спричинює збільшення витрат часу машиніста на зайві маневри; при збільшенні робочих швидкостей машина випробує великі навантаження на ходову частину та трансмісію, що скорочує термін служби внаслідок швидкого зносу.

Бульдозер, обладнаний відвалом із шнековим інтенсифікатором, позбавлений недоліків звичайного бульдозера. Рухаючись на більших робочих швидкостях, він переміщує шнековим інтенсифікатором зрізаний ножем ґрунт за рахунок метання під кутом до повздовжньої осі. Таким чином підвищується продуктивність, а тягове зусилля бульдозера витрачається на різання ґрунту, розгін ґрунту до колової швидкості шнекового інтенсифікатора та на подолання сил тертя ґрунту об відвал і гвинтову поверхню.

Аналіз публікацій. У технічній літературі інформація, яка стосується розрахунку конструктивних параметрів шнеків та призначення їх режимів роботи, міститься в обмеженій кількості. Найбільш повно дана інформація відображена в роботах К. М. Севастьянова [1], Р. Л. Зенкова [2], А. М. Григор'єва [3], В. І. Баловнева, В. М. Шкриль [4], А. О. Співаковського [5], В. С. Сухорукова та А. І. Долгих [6]. Також дана інформація наведених у статтях Л. А. Хмари та Р. М. Кроля [7 – 13].

Мета статті. Базуючись на теорії сипучого середовища, розробити теоретичні основи бічного транспортування ґрунту відвалом бульдозера з шнековим інтенсифікатором, методи розрахунку споживаної шнековим інтенсифікатором потужності, розрахунку конструктивних параметрів та оптимізації режимів роботи.

Виклад матеріалу. При теоретичних дослідженнях бічного транспортування ґрунту, що зрізується прямолінійним різальним ножем відвалу, приймаємо такі припущення:

- ґрунт, що транспортується, являє собою сипуче середовище без зчеплення та характеризується густиною γ , кутом внутрішнього тертя ρ , кутом зовнішнього тертя δ ;

- транспортування ґрунту шнековим інтенсифікатором відбувається безперервним потоком та складається з двох етапів, перший – транспортування ґрунту у зоні його контакту з лобовою поверхнею відвала, другий – транспортування за рахунок вільного польоту ґрунту з початком траєкторії вільного транспортування на рівні верхньої кромки відвальної поверхні, що характеризується кутом відриву φ_k ;

- транспортування ґрунту у зоні контакту з лобовою поверхнею відвалу відбувається з осьовою швидкістю, а під час вільного транспортування – з абсолютною початковою швидкістю, яка складається з колової швидкості та осьової швидкості;

- повне транспортування ґрунту, що зрізується ножем відвалу при переміщенні його за час одного оберту шнекового інтенсифікатора, неможливе за бічні межі відвала, і тому перед робочим органом у напрямку руху базової машини створюється призма накопичення, ґрунт якої повторно захоплюється гвинтовою поверхнею та транспортується у бічному напрямку.

Розрахункові схеми утворення призми накопичення ґрунту перед відвалом бульдозера, обладнаного шнековим інтенсифікатором, та для визначення параметрів ґрунту у просторах витків надані на рисунках 1 та 2.

Відстань осьового переміщення ґрунту за один оберт шнекового інтенсифікатора дорівнює

$$L_{\delta 1} = \frac{\varphi_{\delta}}{2 \cdot \pi} \cdot S + L_1 \cdot \cos \left[\arctg \left(\frac{g_0}{g_{\delta}} \cdot \sin \varphi_{\kappa} \right) \right], \quad (1)$$

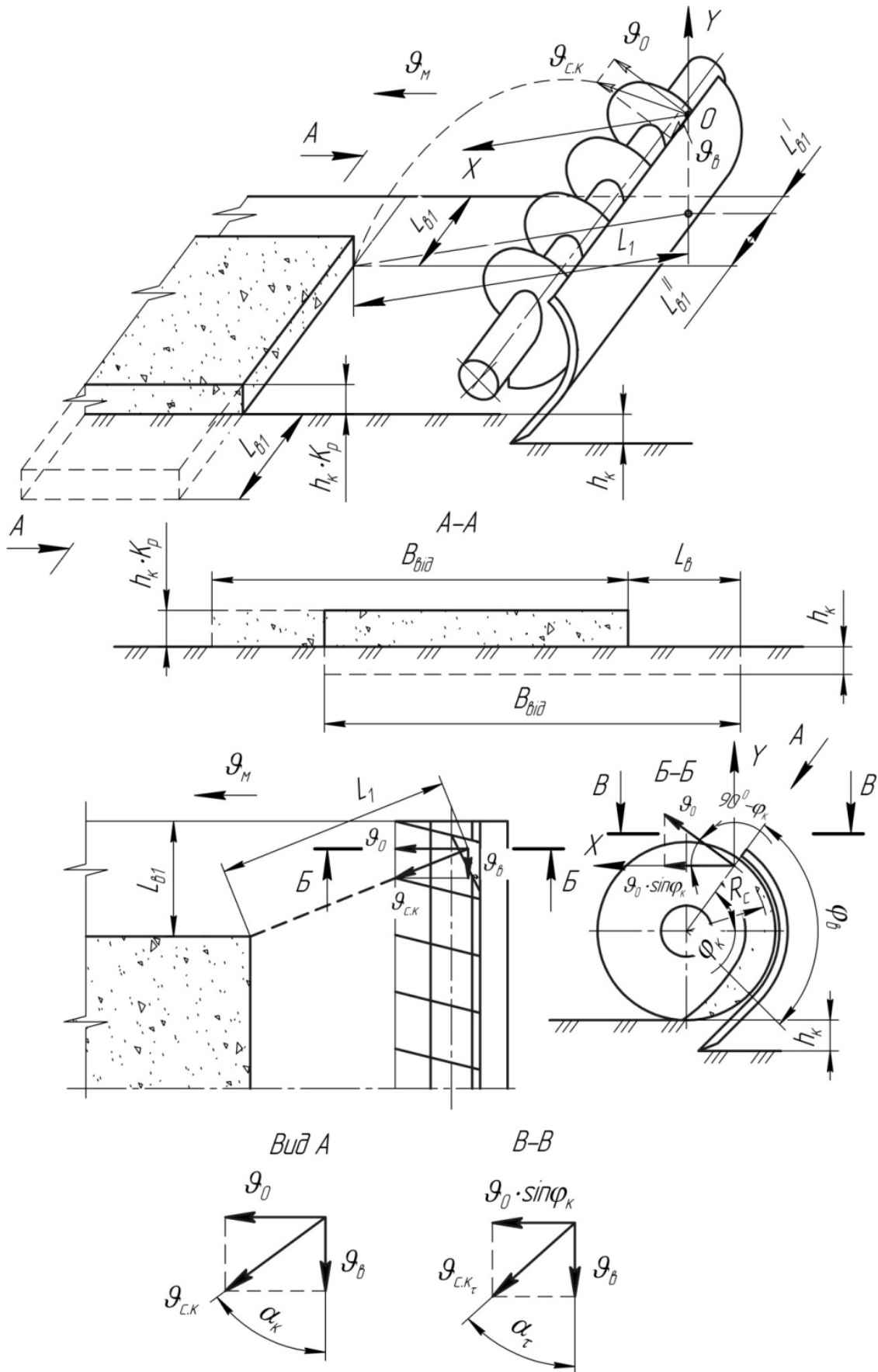


Рис. 1. Розрахункова схема бічного транспортування ґрунту та утворення призми накопичення на початку транспортування

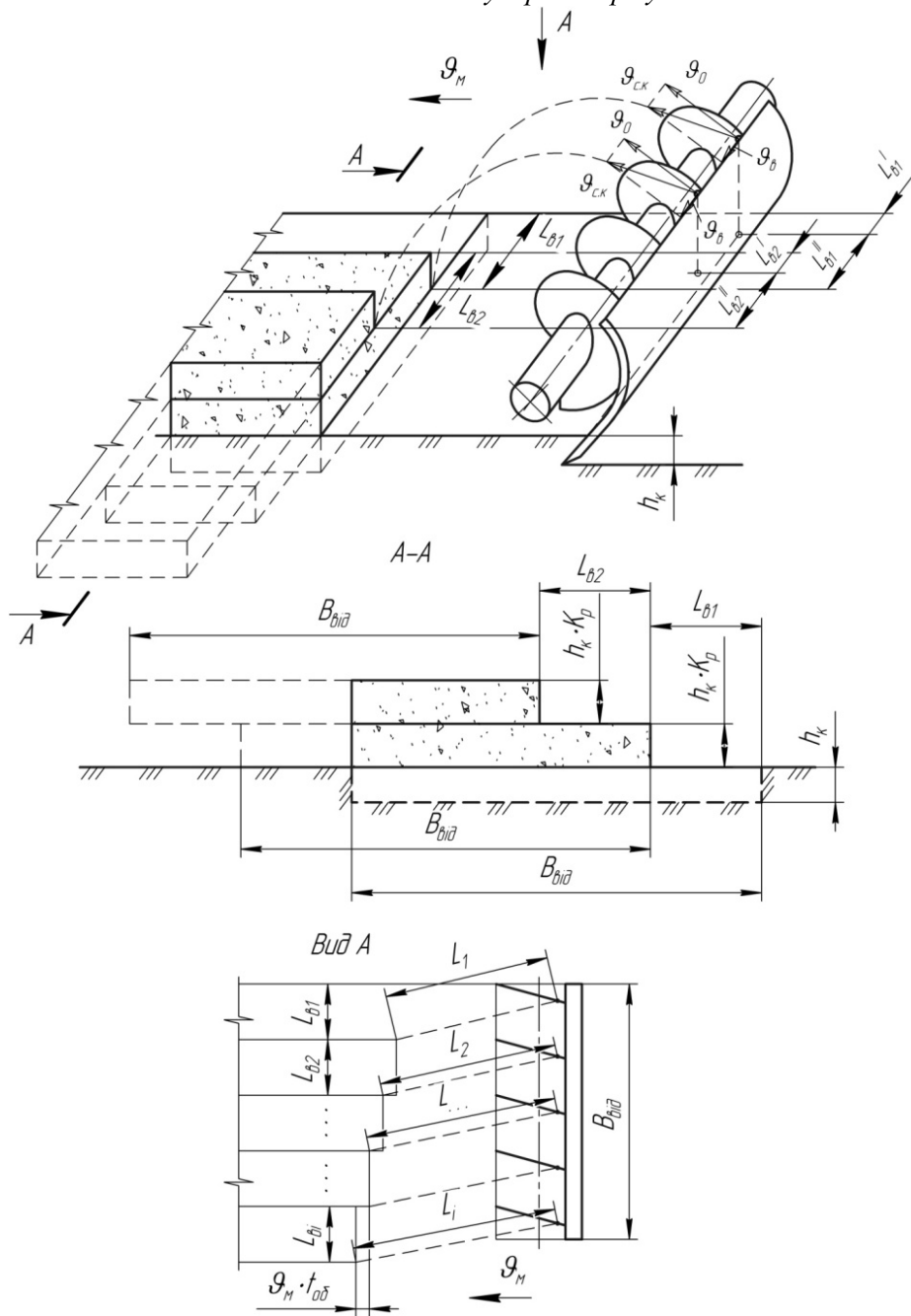


Рис. 2. Розрахункова схема бічного транспортування ґрунту та утворення призми накопичення при сталому режимі

де φ_e – центральний кут, який відповідає криволінійній поверхні відвала; S – крок гвинтової поверхні шнекового інтенсифікатора; L_1 – довжина проекції траєкторії вільного транспортування центра ваги шару ґрунту, зрізаного ножом, на горизонтальну площину; $g_0 = \omega_0 \cdot R_c$ – колова швидкість центра ваги ґрунту у просторах витків ШІ; $g_e = \frac{S \cdot \omega_0}{2 \cdot \pi}$ – осьова швидкість транспортування ґрунту; R_c – радіус центра ваги ґрунту у просторах витків; φ_k – кут метання ґрунту.

Оскільки ШІ постійно обертається та рухається поступово із швидкістю g_M , робочий процес транспортування ґрунту здійснюється безперервно. Далі відбувається захоплення

першого укладеного шару ґрунту III та його переміщення за рахунок метання на відстань L_2 та переміщення з 2-го витка в осьовому напрямку на відстань $L_{\theta 2}$ (рис. 2).

Площа поперечного перерізу i -го шару ґрунту, який потрапляє за межі робочого органа у напрямку бічного транспортування, $K_p \cdot h_k \cdot L_{\theta i}$.

Далі, рухаючись поступово, шнековий інтенсифікатор здійснює наступний захват попередньо укладених шарів ґрунту та їх подальше транспортування у бічному напрямку на відстань $L_{\theta i}$, поки вони не вийдуть за межі робочого органа. Переміщення під час послідовного транспортування шарів ґрунту при киданні на відстань L_i та осьовому переміщенні $L_{\theta i}$ змінюються, тому що зростає висота площини приземлення ґрунту.

Для спрощення приймаємо: об'єм призми накопичення ґрунту складається з окремих шарів ґрунту висотою $K_p \cdot h_k$ із зміщенням один відносно іншого на середню відстань $L_{\theta, cp}$ (рис. 3, а).

Замінімо ступінчасту вільну поверхню ґрунту прямолінійною за рахунок з'єднання середини вертикальних меж кожних шарів ґрунту. Кут нахилу прямої до горизонту дорівнюватиме:

$$\zeta = \arctg \frac{h_k \cdot K_p}{L_{\theta, cp}}. \quad (2)$$

Для подальших теоретичних досліджень необхідно знайти середні значення відстаней $L_{\theta, cp}$ та L_{cp} .

Рівняння руху (рис. 1) центра ваги ґрунту після метання в координатних осях XOY , які мають вигляд:

$$\begin{cases} x = g_c \cdot \sin \varphi_k \cdot t; \\ y = g_c \cdot \cos \varphi_k \cdot t - \frac{g \cdot t^2}{2}, \end{cases} \quad (3)$$

де g_c – початкова швидкість метання центра ваги ґрунту, рзташованого у міжвитковому просторі шнекового інтенсифікатора.

Після виключення часу t із системи рівнянь (3) та з урахуванням того, що для середньої лінії поперечного перерізу призми накопичення $x = L_{cp}$; $y = -(R_{\text{унн}} + R_{c, cp} \cdot \sin \varphi_k) + 0,5 \cdot B_{\text{від}} \cdot \text{tg} \zeta$ та середній радіус центра ваги потоку ґрунту близький до зовнішнього радіуса $R_{c, cp} \approx R_{\text{унн}}$ отримаємо кубічне рівняння для визначення L_{cp} :

$$\begin{aligned} & L_{cp}^3 \cdot \cos \left[\arctg \left(\frac{g_0}{g_e} \cdot \sin \varphi_k \right) \right] \cdot \Omega - L_{cp}^2 \cdot \left\{ \frac{1}{\text{tg} \varphi_k} \cdot \cos \left[\arctg \left(\frac{g_0}{g_e} \cdot \sin \varphi_k \right) \right] - \frac{\varphi_e}{2 \cdot \pi} \cdot S \cdot \Omega \right\} - \\ & - L_{cp} \cdot \left\{ R_{\text{унн}} \cdot \cos \left[\arctg \left(\frac{g_0}{g_e} \cdot \sin \varphi_k \right) \right] + R_{\text{унн}} \cdot \sin \varphi_k \cdot \cos \left[\arctg \left(\frac{g_0}{g_e} \cdot \sin \varphi_k \right) \right] + \right. \\ & \left. + \frac{\varphi_e}{2 \cdot \pi} \cdot S \cdot \frac{1}{\text{tg} \varphi_k} \right\} - \left(\frac{R_{\text{унн}} \cdot \varphi_e \cdot S}{2 \cdot \pi} + \frac{R_{\text{унн}} \cdot \sin \varphi_k \cdot \varphi_e \cdot S}{2 \cdot \pi} - 0,5 \cdot B_{\text{від}} \cdot h_k \cdot K_p \right) = 0, \end{aligned} \quad (4)$$

де $\Omega = \frac{g}{2 \cdot (\omega_0^2 \cdot R_{\text{унн}}^2 + g_e^2) \cdot \sin^2 \varphi_k}$ – введене позначення.

Аналогічно (1) середня відстань зміщення ґрунту у осьовому напрямі дорівнює:

$$L_{\theta, cp} = \frac{\varphi_e}{2 \cdot \pi} \cdot S + L_{cp} \cdot \cos \left[\arctg \left(\frac{g_0}{g_e} \cdot \sin \varphi_k \right) \right]. \quad (5)$$

Умова безперервності потоку ґрунту для останнього витка має вигляд

$$F_{o, \theta} \cdot g_m = (F \cdot R_c) \cdot \omega_0, \quad (6)$$

де $F_{o,6}$ – площа поперечного перерізу призми накопичення ґрунту напроти останнього витка; $(F \cdot R_c)$ – фактичний добуток площі поперечного перерізу потоку ґрунту та радіуса центра ваги ґрунту, що відповідає цій площі в останньому витку; ω_0 – кутова швидкість обертання шнекового інтенсифікатора, що визначається з умови не забивання останнього витка.

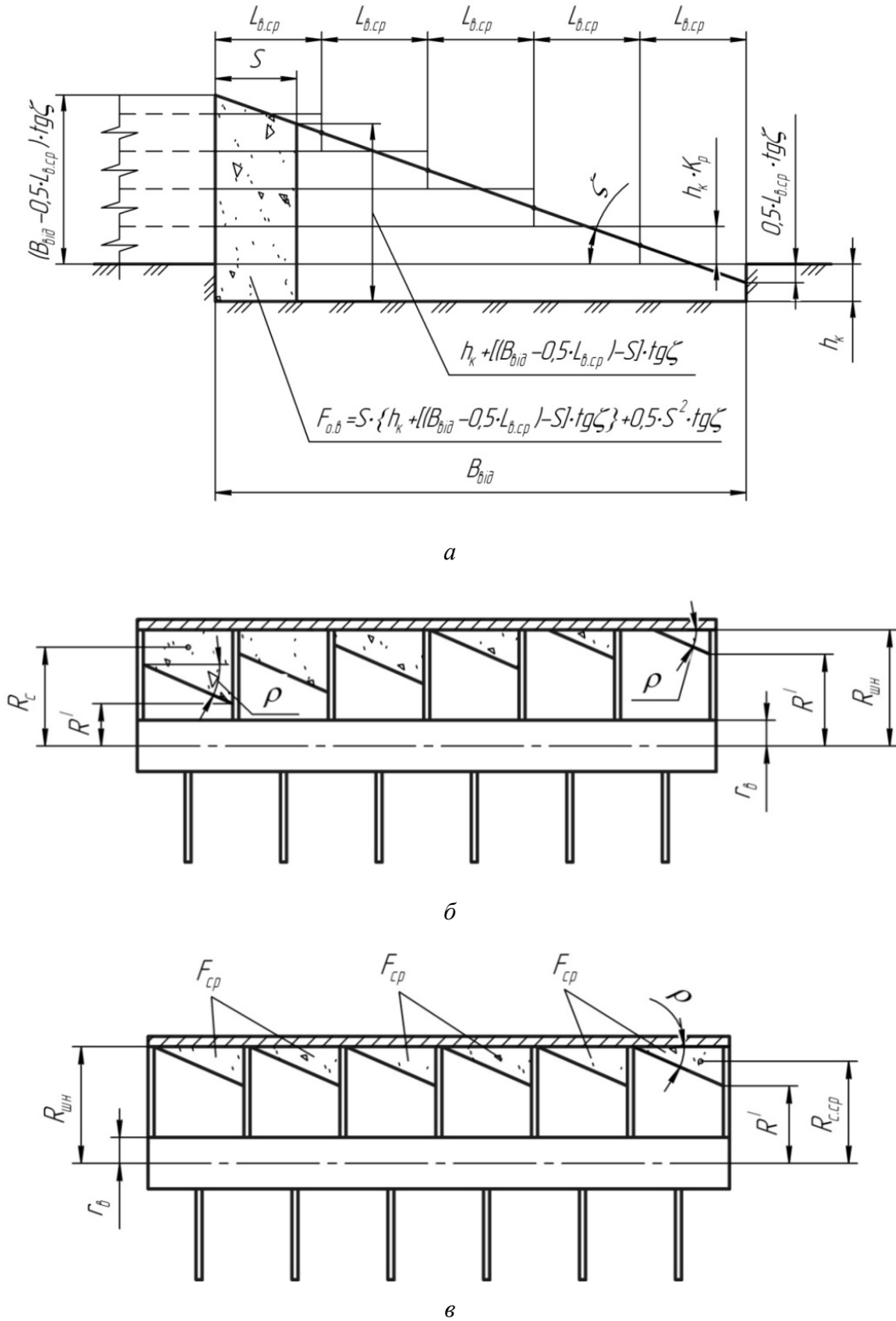


Рис. 3. Поперечний переріз призми накопичення та розподіл ґрунту на витках ШІ: а – поперечний переріз призми накопичення; б – фактичний поперечний переріз ґрунту на витках ШІ; в – осереднений поперечний переріз ґрунту на витках ШІ

Площа ґрунту призми накопичення напроти останнього витка ШІ:

$$F_{o.в} = S \cdot \left\{ h_k + \left[(B_{вiд} - 0,5 \cdot L_{в.ср}) - S \right] \cdot \frac{h_k \cdot K_p}{L_{в.ср}} \right\} + 0,5 \cdot S^2 \cdot \frac{h_k \cdot K_p}{L_{в.ср}}. \quad (7)$$

Тоді постає питання за фактичним числовим значенням $(F \cdot R_c)$ визначити форму поперечного перерізу ґрунту у просторі останнього витка, яка характеризується геометричними параметрами S' , R' та ρ .

Мінімальна кутова швидкість ω_{0min} з умови незабивання останнього витка шнекового інтенсифікатора:

$$\omega_{0min} = \frac{F_{o.в} \cdot \mathcal{G}_m}{[F \cdot R_c]} = \frac{\mathcal{G}_m \cdot \left\{ S \cdot \left\{ h_k + \left[(B_{вiд} - 0,5 \cdot L_{в.ср}) - S \right] \cdot \frac{h_k \cdot K_p}{L_{в.ср}} \right\} + 0,5 \cdot S^2 \cdot \frac{h_k \cdot K_p}{L_{в.ср}} \right\}}{[F \cdot R_c]}, \quad (8)$$

де $[F \cdot R_c]$ – граничне значення добутку, що відповідає не забиванню останнього витка (методику визначення див. [7]).

Для визначення силових та енергетичних параметрів робочого процесу шнекового інтенсифікатора необхідно визначити параметри середньої площі поперечного перерізу ґрунту $F_{ср}$ у просторах витків (рис. 3, в).

Умова безперервності потоку має вигляд:

$$F_{\Sigma} \cdot \mathcal{G}_m = Z_{в} \cdot F_{ср} \cdot \mathcal{G}_{с.ср}, \quad (9)$$

де $\mathcal{G}_{с.ср}$ – лінійна швидкість центра ваги ґрунту із середньою площею поперечного перерізу $F_{ср}$; $Z_{в} = \frac{B_{вiд}}{S}$ – кількість витків; \mathcal{G}_m – швидкість руху бульдозера.

Загальна площа поперечного перерізу ґрунту, що транспортується у напрямку руху базової машини при сталому режимі робочого процесу, дорівнює:

$$F_{\Sigma} = h_k \cdot B_{вiд} + 0,5 \cdot (B_{вiд} - 0,5 \cdot L_{в.ср})^2 \cdot tg\zeta - 0,125 \cdot L_{в.ср}^2 \cdot tg\zeta, \quad (10)$$

де h_k – товщина вирізуваної стружки ґрунту; $B_{вiд}$ – ширина відвала бульдозера.

Лінійна швидкість центра ваги ґрунту рівна

$$\mathcal{G}_{с.ср} = \omega_0 \cdot R_{с.ср}, \quad (11)$$

де $R_{с.ср}$ – радіус центра ваги ґрунту із середньою площею поперечного перерізу.

Фактичний добуток площі та координати центра тяжіння дорівнює:

$$(F_{ср} \cdot R_{с.ср}) = \frac{h_k \cdot \mathcal{G}_m \cdot S}{B_{вiд} \cdot \omega_0} \cdot \left[B_{вiд} + 0,5 \cdot (B_{вiд} - 0,5 \cdot L_{в.ср})^2 \cdot \frac{K_p}{L_{в.ср}} - 0,125 \cdot L_{в.ср} \cdot K_p \right]. \quad (12)$$

Продуктивність робочого процесу з урахуванням взаємодії відвала бульдозера, що обладнано ШІ з ґрунтом призми накопичення, дорівнює:

$$P_m = F_{\Sigma} \cdot \mathcal{G}_m = h_k \cdot \left[B_{вiд} + 0,5 \cdot (B_{вiд} - 0,5 \cdot L_{в.ср})^2 \cdot \frac{K_p}{L_{в.ср}} - 0,125 \cdot L_{в.ср} \cdot K_p \right] \cdot \mathcal{G}_m. \quad (13)$$

Баланс потужності шнекового інтенсифікатора при бічному транспортуванні ґрунту, що зрізується ножом відвала бульдозера, має вигляд:

$$\sum N = N_{p.p} + N_{p.oc} + N_n + N_{m.в}, \quad (14)$$

де $N_{p.p}$ – витрати потужності на розгін ґрунту у радіальному напрямку; $N_{p.oc}$ – витрати потужності на розгін ґрунту в осьовому напрямку; N_n – витрати потужності на підйом ґрунту; $N_{m.в}$ – витрати потужності на подолання сил тертя ґрунту по поверхні відвала.

Потужність (кВт), що витрачається на розгін ґрунту в радіальному напрямку:

$$N_{p.p} = \Pi_m \cdot \gamma \cdot \frac{\omega_0^2 \cdot R_{c.cp}^2}{2000}, \quad (15)$$

де γ – густина ґрунту, кг/м³.

Потужність (кВт), що витрачається на розгін ґрунту у осьовому напрямку:

$$N_{p.oc} = \Pi_m \cdot \gamma \cdot \frac{g^2}{2000}. \quad (16)$$

Потужність (кВт), що витрачається на підйом ґрунту:

$$N_n = \Pi_m \cdot g \cdot \gamma \cdot \frac{(R_{ши} + R_{c.cp} \cdot \sin \varphi_k)}{1000}. \quad (17)$$

Потужності (кВт), що витрачаються на подолання сил тертя ґрунту по поверхні відвала:

$$N_{m.g} = N'_{m.g} + N''_{m.g}, \quad (18)$$

де $N'_{m.g}$ – витрати потужності на подолання сил тертя ґрунту по поверхні відвала від радіального руху ґрунту; $N''_{m.g}$ – витрати потужності на подолання сил тертя ґрунту по поверхні відвала від осьового руху ґрунту.

Потужність (кВт), що витрачається на подолання сил тертя ґрунту по поверхні відвала від радіального руху ґрунту:

$$N'_{m.g} = \frac{Z_g \cdot (F_{вц.g} + m_{cp} \cdot g \cdot \cos \frac{\varphi_g}{2}) \cdot \operatorname{tg} \delta \cdot \omega_0 \cdot R_{c.cp}}{1000}. \quad (19)$$

де $F_{вц.g}$ – відцентрова сила, яка діє на ґрунт, що контактує з поверхнею відвала; m_{cp} – маса ґрунту, яка контактує з поверхнею відвала.

Потужність (кВт), що витрачається на подолання сил тертя ґрунту по поверхні відвала від осьового руху ґрунту:

$$N''_{m.g} = \frac{Z_g \cdot (F_{вц.g} + m_{cp} \cdot g \cdot \cos \frac{\varphi_g}{2}) \cdot \operatorname{tg} \delta \cdot g}{1000}. \quad (20)$$

Маса ґрунту дорівнює:

$$m_{cp} = \frac{F_{cp} \cdot \varphi_g \cdot R_{c.cp} \cdot \gamma}{\cos \alpha_{c.cp}}, \quad (21)$$

де $\alpha_{c.cp} = \operatorname{arctg} \frac{S}{2 \cdot \pi \cdot R_{c.cp}}$ – кут підйому гвинтової поверхні ШІ на радіусі $R_{c.cp}$.

Відцентрова сила

$$F_{вц.g} = m_{cp} \cdot \omega_0^2 \cdot R_{c.cp} \quad \text{або} \quad F_{вц.g} = \frac{F_{cp} \cdot \varphi_g \cdot R_{c.cp}^2 \cdot \omega_0^2 \cdot \gamma}{\cos \alpha_{c.cp}}. \quad (22)$$

З урахуванням (21), (22) потужності $N'_{m.g}$ та $N''_{m.g}$ відповідно дорівнюють

$$N'_{m.g} = \frac{Z_g \cdot \gamma \cdot F_{cp} \cdot \varphi_g \cdot \omega_0 \cdot R_{c.cp}^2 \cdot \operatorname{tg} \delta}{1000 \cdot \cos \alpha_{c.cp}} \cdot \left(R_{c.cp} \cdot \omega_0^2 + g \cdot \cos \frac{\varphi_g}{2} \right); \quad (23)$$

$$N''_{m.g} = \frac{Z_g \cdot \gamma \cdot F_{cp} \cdot \varphi_g \cdot R_{c.cp} \cdot g \cdot \operatorname{tg} \delta}{1000 \cdot \cos \alpha_{c.cp}} \cdot \left(R_{c.cp} \cdot \omega_0^2 + g \cdot \cos \frac{\varphi_g}{2} \right). \quad (24)$$

Крутний момент на привідному валу шнекового інтенсифікатора:

$$M_{кр} = \frac{1000 \cdot \sum N}{\omega_0}. \quad (25)$$

Енергоємність робочого процесу бічного транспортування ґрунту при копанні

$$E = \frac{\sum N}{\Pi_m}. \quad (26)$$

- Висновки.** 1. З умови безперервності потоку отримано залежності значення критичної кутової швидкості обертання шнекового інтенсифікатора від швидкості руху базової машини при копанні ґрунту.
2. Отримано вираз для обчислення середнього значення осьового зміщення ґрунту.
3. Розроблено баланс потужності шнекового інтенсифікатора при бічному транспортуванні ґрунту.

ВИКОРИСТАНА ЛІТЕРАТУРА

1. **Севастьянов К. М.** Исследование энергоемкости процесса экскавации торфа из залежи горизонтальными шнек-фрезами: автореф. дис. ... на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук / К. М. Севастьянов. – Калинин : КПИ, 1973. – 23 с.
2. **Зенков Р. Л.** Машины непрерывного транспорта / Р. Л. Зенков – М. : Машиностроение, 1980. – 303 с.
3. **Григорьев А. М.** Винтовые конвейеры / А. М. Григорьев. – М. : Машиностроение, 1972. – 182 с.
4. **Баловнев В. И.** Исследование работы отвалов с механической интенсификацией / В. И. Баловнев, В. Н. Шкрыль // «Строительные и дорожные машины», 1978. – № 4. – С. 24 – 26.
5. **Спиваковский А. О.** Специальные транспортирующие устройства в горнодобывающей промышленности / А. О. Спиваковский, И. П. Гончаревич. – М. : Недра, 1985. – 129 с.
6. **Сухоруков В. С.** Снижение энергоемкости транспортирования ґрунта горизонтальным шнеком / В. С. Сухоруков, А. И. Долгих / В кн.: Проблемы сельскохозяйственной мелиорации в Поволжье. – Саратов, 1984. – С. 167 – 170.
7. **Хмара Л. А.** Методика расчета винтошнекового интенсификатора на рабочем оборудовании бульдозера / Л. А. Хмара, Р. Н. Кроль, И. А. Соколов, Е. И. Урих // Зб. наук. пр.: Галузеве машинобудування, будівництво. Вип. 6. Ч. 1. – Полт. держ. техн. ун-т ім. Юрія Кондратюка, 2000. – С. 75 – 77.
9. **Хмара Л. А.** Робочий орган бульдозера із шнековим інтенсифікатором / Л. А. Хмара, Р. М. Кроль // Вісник Придніпр. держ. акад. будівниц. та архітект. – Д. : ПДАБА, 2001. – № 12. – С. 51 – 57.
10. **Хмара Л. А.** Теоретичні та експериментальні дослідження шнекового інтенсифікатора на робочому обладнанні бульдозера / Л. А. Хмара, Р. М. Кроль, І. А. Соколов // Зб. наук. пр.: Вісник УДУВГП. – Рівне, 2002. – Вип. 5 (18), Ч. 6.– С. 84 – 94.
11. **Хмара Л. А.** Призначення режимів роботи шнекового інтенсифікатора / Л. А. Хмара, Р. М. Кроль // Сб. науч. тр.: Строительство. Материаловедение. Машиностроение. Серия: Стародубовские чтения. – Д. : ПГАСА, 2003. – С. 230 – 231.
12. **Хмара Л. А.** Визначення критичної частоти обертання та висоти зависання ґрунту для шнекового інтенсифікатора на робочому обладнанні бульдозера при пошаровій розробці ґрунту / Л. А. Хмара, Р. М. Кроль // Сб. науч. тр.: Строительство. Материаловедение. Машиностроение. Серия: Подъемно-транспортные, строительные и дорожные машины и оборудование. – Д. : ПГАСА, 2004. – Вып. 26. – С. 57 – 66.
13. **Хмара Л. А.** Теоретическое исследование режимов работы шнекового интенсификатора / Л. А. Хмара, Р. Н. Кроль // Интерстроймех – 2005: Тр. Междунар. науч.-техн. конф. – Тюмень, 2005. – Ч. 1. – С. 262 – 266.

УДК 504.064.4:669.181.28

ЕКОЛОГІЧЕСКИ БЕЗОПАСНЫЕ СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ ГРАНШЛАКОВ СИЛИКОМАНГАНА И ДОМЕННЫХ ГРАНШЛАКОВ

Н. В. Спильник, асп., С. А. Щербак, д. т. н., проф.

Ключевые слова: экологическая безопасность, эмиссия, тяжелые металлы, шлаки, заполнитель, мелкозернистый бетон

Постановка проблемы. Сегодня, в результате развития научно-технического прогресса, требуется значительный вклад науки в решение актуальных проблем, возникающих при изготовлении строительных материалов, а именно: