

applications-for-development-management-information-resources: - Санкт-Петербургский государственный инженерно-экономический университет.

14. Рудинский А.В. Искусственный интеллект в сетевых войнах XXI века. // [Электронный ресурс] // <http://www.oborona.ru/includes/periodics/conceptions/2011/0905/22247309/detail.shtml>.

15. Рудинский А.В. Метод оценки качества адаптивных автоматических классификаторов, основанный на оценке IQ, Нейрокомпьютеры: разработка и применение", Рудинский А.В., А.С. Ермоленко 2007, С. 25-29.

16. Кудрявцев Е.М. Комплексная механизация, автоматизация и механовооруженность строительства / Е.М. Кудрявцев - М.: - Стройиздат, 1989. – 246 с.

17. Технологические карты на устройство земляного полотна и дорожной одежды [Электронный ресурс] [http://www.pavement.ru/tehnologicheskie\\_karty\\_na\\_ustroistvo\\\_zemlyanogo\\_polotna\\_i\\_dorojnoi\\_odejdy\\_2/84-raschety\\_proizvoditelnosti\\_mashin\\_2.html](http://www.pavement.ru/tehnologicheskie_karty_na_ustroistvo\_zemlyanogo_polotna_i_dorojnoi_odejdy_2/84-raschety_proizvoditelnosti_mashin_2.html)

**УДК 621.872:69.0025**

**Л. А. ХМАРА, докт. техн. наук.,**

**Р. М. КРОЛЬ, инж., В. С. БОГДАН, студент**

*ДВНЗ "Придніпровська державна академія будівництва та архітектури"*

## **БУЛЬДОЗЕР, ОСНАЩЕНИЙ ШНЕКОВИМ ІНТЕНСИФІКАТОРОМ - УНІВЕРСАЛЬНА МАШИНА ДЛЯ БІЧНОГО ТРАНСПОРТУВАННЯ ҐРУНТУ**

**Вступ.** Географічне розташування України сприяє транспортуванню через її територію із країн СНД до країн Європи нафти та газу, для чого використовуються трубопроводи. Відмітні особливості проведення робіт по засипці траншей (великі об'єми робіт, велика протяжність трубопроводу, значна віддаленість об'єктів будівництва від баз механізації, часте перебазування машин із об'єкту на об'єкт, велика кількість різноманітних технологічних операцій) визначають специфічні вимоги до машин, що використовуються при даних роботах.

**Постановка проблеми.** Незважаючи на такі переваги бульдозера, як універсальність, простота конструкції та маневреність, використання цих машин для засипки траншей має свої недоліки. Робота проводиться циклічними, човниковими рухами машини, що збільшує смугу відчуження, на смугі відчуження порушується родючий шар ґрунту, на полях залишаються нерівності; збільшуються витрати часу,

палива та праці в порівнянні з безперервним способом засипки; машина випробовує великі навантаження на ходову частину та трансмісію, що скорочує термін служби внаслідок швидкого зносу.

Крім вказаних недоліків також погіршується якість засипки траншеї: нерівномірна подача ґрунту в траншею великими порціями призводить до пошкоджень ізоляції труб та утворення пустот, в наслідок чого – осідання та вимивання ґрунту; до зміщення труб відносно один одного.

Бульдозер, обладнаний відвалом з шнековим інтенсифікатором, позбавлений недоліків звичайного бульдозера. Рухаючись вздовж траншеї, він переміщує в неї розпушений ґрунт, що не падає на трубопровід, а скочується по ньому. При цьому окружна швидкість ріжучої кромки шнекового інтенсифікатора перевищує швидкість переміщення базової машини, що забезпечує сильне подрібнення ґрунту (до розпилення) перед подачею в траншею.

**Аналіз публікацій.** В 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 Севастьянова К.М. [1], Зенкова Р.Л. [2], Григор'єва А.М. [3], Баловнєва В.І., Шкриля В.М. [4].

**Основна частина.** Геометричні параметри ШІ на РО бульдозера (рис. 1) визначаються шириною  $B_{eid}$ , висотою  $H_{eid}$  та радіусом  $R_{eid}$  відвала, кутом різання  $\alpha_p$  ґрунту, кутом нахилу криволінійної частини відвалу  $\xi_1$ , кутом нахилу відвалу до горизонту  $\xi$ , кутом криволінійної частини відвала  $\varphi_e$ , кутом перекидання  $\beta_0$ , довжиною  $L_{ин}$ , зовнішнім діаметром  $D_{ин}$ , діаметром привідного вала  $d_e$ , кроком  $S$  гвинтової навивки, кутом відриву ґрунту від гвинтової поверхні  $\varphi_k$ . Кінематичні параметри робочого процесу визначаються кутовою швидкістю  $\omega_0$  обертання ШІ та поступальною швидкістю  $\mathcal{G}_m$  пересування базової машини. До умов взаємодії з ґрунтом належить глибина копання ґрунту  $h_k$ , висота кавальєру  $H_k$ , кут природного відкосу ґрунту  $\varphi_0$  та фізико-механічні властивості ґрунту – зчеплення  $C_w$ , щільність ґрунту у природному стані  $\gamma$ , коефіцієнт розпушення  $K_p$ , кути зовнішнього  $\delta$  та внутрішнього  $\rho$  тертя.

Пошукові дослідження дозволили виявити наступні особливості робочого процесу:

– важливе значення має напрямок обертання ШІ, оскільки необхідно, щоб

захоплений гвинтовою поверхнею ґрунт відразу потрапляє в простір між лобовою поверхнею відвалу та гвинтовою поверхнею ШІ, а не відкидається вперед нижньою частиною ШІ, утворюючи призму, що буде постійно зростати;

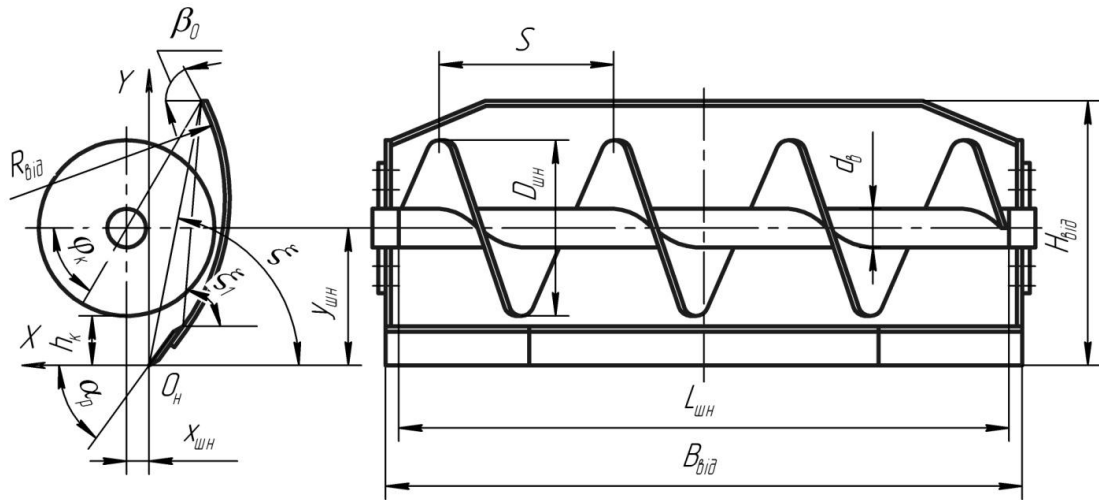


Рис. 1. Геометричні параметри ШІ на РО бульдозера.

– зазор між периферією гвинтової ШІ та лобовою поверхнею відвалу повинен бути мінімальним. Необхідно, щоб зрізаний ножем ґрунт відразу і в повній мірі захоплювався гвинтовою поверхнею ШІ. Наявність будь-якого зазору між вище згадуваними елементами призводить до нераціональної витрати енергії на подолання сил тертя при підйомі ґрунту об лобову поверхню відвалу та утворення зон зависання ґрунту;

– бічне транспортування ґрунту ШІ на РО бульдозера має особливість : до ґрунту, що транспортується, у кожному витку ШІ безперервно додається ґрунт, який зрізається ножем відвалу бульдозера. По мірі наближення до видаючого кінця ШІ об'єм ґрунту, що транспортується, зростає;

– фізична картина робочого процесу залежить від режиму роботи ШІ, що визначається його частотою обертання. Кожному із режимів відповідає своя фізична картина процесу, різний характер руху матеріалу. Так, умовно можна розрізнити докритичний, критичний та закритичний режим. При закритичному режимі транспортування ґрунту ШІ 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  $\varphi_k$ ;

– транспортування ґрунту в зоні контакту з лобовою поверхнею відвала

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 ножом відвала при переміщенні його за час одного оберту ШІ, 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 напрямі.

За результатами теоретичного дослідження копання ґрунтової поверхні автором розроблено математичні моделі для визначення критичної кутової швидкості обертання ШІ, середньої відстані зміщення ґрунту в осьовому напрямі, граничних площ поперечного перерізу ґрунту у міжвитковому просторі ШІ, силових та енергетичних параметрів робочого процесу.

Дотична складова опору різанню ґрунту ножом відвала бульдозера визначається аналогічно формулі проф. В. І. Баловнева, в якій уточняється розподільний тиск :

$$\delta_{i\bar{e}} = 9,81 \cdot \gamma_{\delta} \cdot h_{i\bar{e}}, \quad (1)$$

де  $\gamma_p$  – щільність зруйнованого ґрунту, кг/м<sup>3</sup>;  $h_{i\bar{e}} = R_{\phi i} \cdot (1 - \cos \varphi_{\phi \delta})$  – висота ґрунту від поверхні копання до початку його захвату ШІ;

$\varphi_{\phi \delta} = \arctg \frac{\cos \alpha_i \cdot \operatorname{tg} \rho \cdot \operatorname{tg} \delta - \operatorname{tg} \rho \cdot \sin \alpha_i}{\cos \alpha_i - \sin \alpha_i \cdot \operatorname{tg} \delta}$  – кут захвату ґрунту гвинтовою поверхнею ШІ;

$\alpha_i = \frac{1}{2} \cdot \arctg \frac{S}{2 \cdot \pi \cdot R_{\phi i}} \cdot \left\{ 1 + \sin \left[ 2 \cdot \left( \varphi_0 - \frac{\pi}{4} \right) \right] \right\}$  – поточний кут нахилу гвинтової лінії до

вертикалі в залежності від кута  $\varphi_0$  положення утворюючої гвинтової поверхні ШІ відносно горизонтальної осі його симетрії.

Розрахункові схеми утворення призми накопичення ґрунту при закритичному режимі надано на рисунку 2.

Геометричні параметри призми накопичення ґрунту залежать від кутової швидкості обертання та конструктивних параметрів ШІ.

Критична кутова швидкість  $\omega_{0кр}$ , що визначається з умови незабивання ґрунтом останнього витка ШІ :

$$\omega_{0\bar{e}\delta} = \frac{F_{i,\bar{a}} \cdot \mathcal{G}_i}{[F \cdot R_{\bar{n}}]} = \mathcal{G}_i \cdot \left\langle S \cdot \left\{ h_{\bar{e}} + \left[ (\hat{A}_{\bar{a}\bar{v}\bar{i}} - 0,5 \cdot L_{\bar{a}\bar{n}\delta}) - S \right] \cdot \frac{h_{\bar{e}} \cdot \hat{E}_{\delta}}{L_{\bar{a}\bar{n}\delta}} \right\} + 0,5 \cdot S^2 \cdot \frac{h_{\bar{e}} \cdot \hat{E}_{\delta}}{L_{\bar{a}\bar{n}\delta}} \right\rangle / [F \cdot R_{\bar{n}}], \quad (2)$$

де  $F_{o,\bar{e}}$  – площа ґрунту призми накопичення напроти останнього витка ШІ;  $K_p$  – коефіцієнт розпушення ґрунту;  $L_{\bar{a}\bar{n}\delta} = \frac{\varphi_{\bar{a}}}{2 \cdot \pi} \cdot S + L_{\bar{n}\delta} \cdot \cos \left[ \arctg \left( \frac{\mathcal{G}_0}{\mathcal{G}_{\bar{a}}} \cdot \sin \varphi_{\bar{e}} \right) \right]$  – середня

відстань зміщення ґрунту в осьовому напрямі;  $\varphi_0$  – центральний кут, який відповідає криволінійній поверхні відвала;  $\mathcal{G}_0 = \omega_{0\text{ед}} \cdot R_{c.\text{пд}}$  – колова швидкість середнього центра ваги ґрунту у просторах витків ШІ;  $\mathcal{G}_a = 0,5 \cdot S \cdot \omega_{0\text{ед}} / \pi$  – осьова швидкість транспортування ґрунту;  $R_{c.\text{cp}}$  – середній радіус центра ваги ґрунту у просторах витків ШІ;  $L_{\text{cp}}$  – середня відстань транспортування ґрунту за межами ШІ;  $[F \cdot R_c]$  – граничне значення добутку площі поперечного перерізу ґрунту у міжвитковому просторі ШІ та координати її центра ваги.

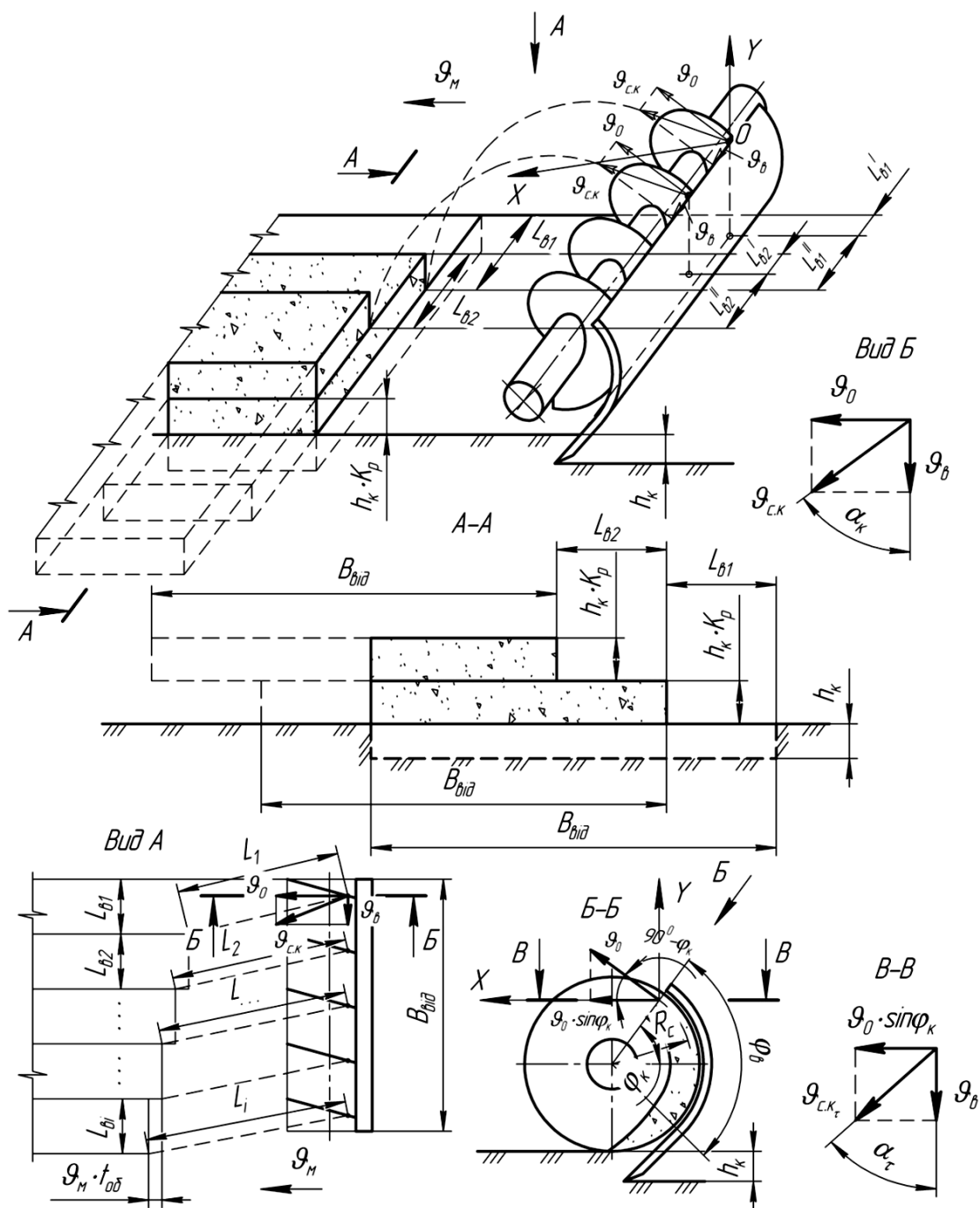


Рис. 2. Розрахункова схема бічного транспортування ґрунту при копанні.

Граничне значення добутку  $[F \cdot R_c]$  залежить від геометричних параметрів ШІ (рис. 1) та кута  $\delta$  зовнішнього тертя ґрунту по сталі. Найбільш завантаженим буде крайній виток гвинтової поверхні ШІ, який знаходиться з боку виходу на зовні ґрунту, що транспортується. Для нормального транспортування ґрунту останнім витком кут підйому його гвинтової поверхні  $\alpha'$  на відстані  $R'$ , що визначається формулою  $\alpha' = \arctg[S/(2 \cdot \pi \cdot R')]$ , повинен задовольняти умові  $\alpha' \leq 90^\circ - \delta$ . У протилежному випадку буде здійснюватись перекидання ґрунту через привідний вал ШІ, що призведе до відсутності осьового переміщення ґрунту. У випадку, коли на відстані  $R' < r_g$ , мінімальна відстань приймається  $R' = r_g$ .

Критична кутова швидкість  $\omega_{0\delta}$  та середня відстань зміщення ґрунту  $L_{c,sp}$  є взаємозалежними величинами і визначаються методом послідовного наближення.

Форма поперечного перерізу визначається виконанням умови :

$$\rho > \psi_\phi = \arctg \frac{R_{\phi i} - r_a}{S}. \quad (3)$$

При виконанні умови (3) завжди отримаємо форму поперечного перерізу ґрунту у формі трикутника (рис. 3, а) із  $S' < S$ , а добуток  $[F \cdot R_c]$  визначається згідно (5). При невиконанні умови (3) можливі два випадки: трапецієвидна (рис. 3, б) та трикутна (рис. 3, в) форми, а граничний добуток визначається згідно (6) та (7) відповідно. Для визначення форми ґрунту необхідно порівняти значення добутку  $F \cdot R_c$  із значенням граничного добутку  $[F \cdot R_c]$ , коли здійснюється перехід від трикутної форми (рис. 3, а) до трапецієвидної (рис. 3, б) при умові  $S' = S$  (рис. 3, в).

Баланс потужності (кВт) ШІ при копанні ґрунту має наступний вигляд:

$$\sum N = N_{\delta,\delta} + N_{\delta,\dot{m}} + N_i + N_{\delta,a}, \quad (4)$$

де  $N_{\delta,\delta} = \dot{I}_\delta \cdot \gamma \cdot \omega_0^2 \cdot R_{n,\bar{n}\delta}^2 / 2000$  – витрати потужності на розгін ґрунту у радіальному напрямі;  $R_{c,sp} = (F_{cp} \cdot R_{c,sp}) / F_{cp}$  – середній радіус центру ваги поперечного перерізу;  $\dot{I}_\delta = h_e \cdot [\hat{A}_{a\bar{a}} + 0,5 \cdot (\hat{A}_{a\bar{a}} - 0,5 \cdot L_{a,\bar{n}\delta})^2 \cdot \hat{E}_\delta / L_{a,\bar{n}\delta} - 0,125 \cdot L_{a,\bar{n}\delta} \cdot \hat{E}_\delta] \cdot \mathcal{G}_i$  – продуктивність робочого процесу;  $N_{\delta,\dot{m}} = \dot{I}_\delta \cdot \gamma \cdot \mathcal{G}_a^2 / 2000$  – витрати потужності на розгін ґрунту у осьовому напрямі;  $N_n = \Pi_m \cdot g \cdot \gamma \cdot (R_{un} + R_{c,sp} \cdot \sin \varphi_\kappa) / 1000$  – витрати потужності на підйом ґрунту;  $N_{\delta,a} = \frac{Z_a \cdot \gamma \cdot F_{n\delta} \cdot \varphi_a \cdot R_{n,\bar{n}\delta} \cdot \text{tg } \delta}{1000 \cdot \cos \alpha_{n,\bar{n}\delta}} \cdot \left( R_{n,\bar{n}\delta} \cdot \omega_0^2 + g \cdot \cos \frac{\varphi_a}{2} \right) \cdot [\omega_0 \cdot R_{n,\bar{n}\delta} + \mathcal{G}_a]$  – витрати потужності на подолання сил тертя ґрунту по поверхні відвала.

$$[F \cdot R_c] = 0,5 \cdot (R_{\text{шн}} - R')^2 \cdot \text{ctg} \rho \times [R' + \frac{2}{3} \cdot (R_{\text{шн}} - R')] \quad (5)$$

$$\alpha' = \arctg \frac{S}{2 \cdot \pi \cdot R'} \leq 90^\circ - \delta$$

$$[F \cdot R_c] = [(R_{\text{шн}} - R') \cdot S - 0,5 \cdot S^2 \cdot \text{tg} \rho] \times \frac{0,5 \cdot S \cdot \text{tg} \rho \cdot (R' + \frac{2}{3} \cdot S \cdot \text{tg} \rho) + R_{\text{шн}} \cdot [(R_{\text{шн}} - R') - S \cdot \text{tg} \rho] - 0,5 \cdot [(R_{\text{шн}} - R') - S \cdot \text{tg} \rho]^2}{(R_{\text{шн}} - R') - 0,5 \cdot S \cdot \text{tg} \rho} \quad (6)$$

$$[F \cdot R_c] = 0,5 \cdot S^2 \cdot \text{tg} \rho \times (R_{\text{шн}} - \frac{1}{3} \cdot S \cdot \text{tg} \rho) \quad (7)$$

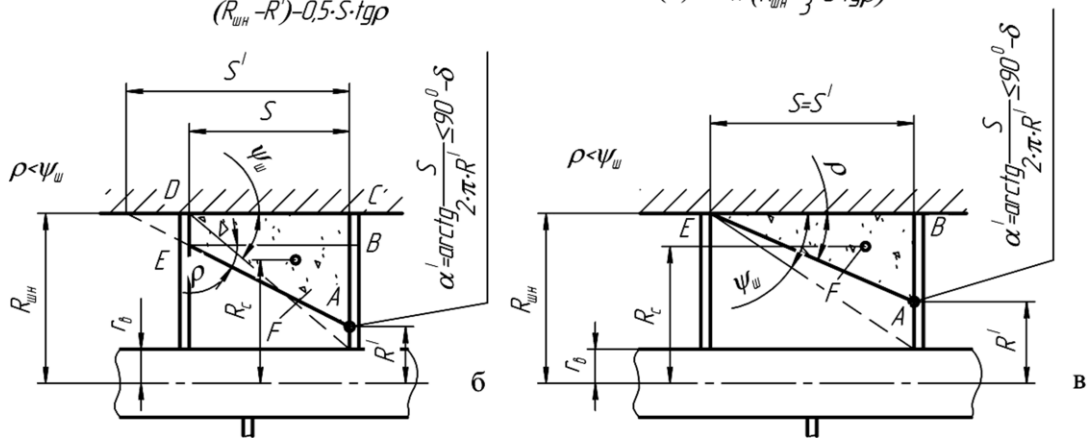


Рис. 3. Варіанти граничних форм поперечного перерізу ґрунту для останнього витка ШІ: а –  $S' < S$ ;  $R' > r_0$ ;  $\rho > \psi_6$ ; б –  $S' > S$ ;  $R' > r_0$ ;  $\rho < \psi_6$ ; в –  $S' = S$ ;  $R' > r_0$ ;  $\rho < \psi_6$ .

Крутний момент на привідному валу ШІ:

$$\dot{I}_{\text{ед}} = 1000 \cdot \sum N / \omega_0. \quad (8)$$

Енергоємність робочого процесу ШІ бічного транспортування ґрунту при копанні:

$$\dot{A} = \sum N / \dot{I}_{\text{д}}. \quad (9)$$

За результатами теоретичного дослідження засипки траншеї автором розроблено математичні моделі для визначення критичної кутової швидкості обертання ШІ, максимальної та мінімальної відстаней метання ґрунту, силових та енергетичних параметрів робочого процесу.

Розрахункову схему для визначення критичної кутової швидкості обертання ШІ та відстані вільного транспортування ґрунту представлено на рисунку 4.

При визначенні критичної кутової швидкості обертання ШІ перевіряється виконання умови:

$$D_{\text{of}} < \dot{I}_{\text{д}} - h_{\text{д}} - 0,5 \cdot S \cdot \text{tg} \varphi_0. \quad (10)$$

Критична кутова швидкість визначається:

1. При виконанні умови (10) :

– за умови незабивання видаючого витка ШІ :

$$\omega_{0\text{об}} = \mathcal{G}_i \cdot [H_\varepsilon \cdot B_\varepsilon - (D_{\phi i} + h_\varepsilon)^2 \cdot \tilde{n} \operatorname{tg} \varphi_0] \cdot \cos \alpha_c / \{2 \cdot [F \cdot R_c]\}; \quad (11)$$

– за умови відсутності гравітаційного потрапляння вершини ґрунту кавальєру (В<sub>1</sub>ВВ<sub>2</sub>, рис. 4) у внутрішню порожнину ШІ :

$$\omega_{0\text{об}} = G_S \cdot \sqrt{1 + \frac{S^2}{4 \cdot \pi^2 \cdot R_{\phi i}^2}} \left/ \left[ \gamma \cdot \mathcal{G}_i \cdot F_\varepsilon \cdot (\pi - \varphi_\varepsilon) \cdot \sqrt{R_{\phi i}^2 + \frac{S^2}{4 \cdot \pi^2} \cdot \cos \frac{\varphi_\varepsilon}{2}} \right] \right., \quad (12)$$

де  $G_S = \gamma \cdot F \cdot R_{\phi i} \cdot \omega_0^2 \cdot (\pi - \varphi_\varepsilon) \cdot \sqrt{R_{\phi i}^2 + \frac{S^2}{4 \cdot \pi^2} \cdot \cos \frac{\varphi_\varepsilon}{2}}$  – вага ґрунту, що зосереджена у вершині кавальєру та припадає на один крок ШІ;  $F$  – гранична площа поперечного перерізу у міжвитковому просторі ШІ;  $F_\varepsilon = F_{A_1 B_1 B C} = 0,25 \cdot B_\varepsilon \cdot H_\varepsilon + 0,5 \cdot S \times (H_\varepsilon - 0,25 \cdot S \cdot \operatorname{tg} \varphi_0)$  – площа фігури  $\hat{A}_1 \hat{A}_1 \hat{A} \tilde{N}$  (рис. 4).

2. При невиконанні умови (10) :

$$\omega_{0\text{об}} = \mathcal{G}_i \cdot H_\varepsilon \cdot B_\varepsilon \cdot \cos \alpha_c / (2 \cdot [F \cdot R_c]). \quad (13)$$

Значення граничного добутку  $[F \cdot R_c]$  та геометричні параметри  $R'$ ,  $S'$  та  $R_c$  поперечного перерізу ґрунту визначаються аналогічно як і для копання ґрунту.

Максимальна та мінімальна відстані метання ґрунту :

$$L_{\max} = \mathcal{G}_\varepsilon \cdot \sin \varphi_\varepsilon \cdot \left( \mathcal{G}_\varepsilon \cdot \cos \varphi_\varepsilon + \sqrt{\mathcal{G}_\varepsilon^2 \cdot \cos^2 \varphi_\varepsilon + 2 \cdot g \cdot H_{\hat{a} \hat{y} \hat{q}}} \right) / g; \quad (14)$$

$$L_{\min} = \mathcal{G}'_\varepsilon \cdot \sin \varphi_\varepsilon \cdot \left( \mathcal{G}'_\varepsilon \cdot \cos \varphi_\varepsilon + \sqrt{\mathcal{G}'_\varepsilon{}^2 \cdot \cos^2 \varphi_\varepsilon + 2 \cdot g \cdot \hat{I}_{\hat{a} \hat{y} \hat{d}_2}} \right) / g, \quad (15)$$

де  $\mathcal{G}_\varepsilon = \sqrt{S^2 \cdot \omega_0^2 / (4\pi^2) + \omega_0^2 \cdot R_{\phi i}^2}$ ,  $\mathcal{G}'_\varepsilon = \sqrt{S^2 \cdot \omega_0^2 / (4\pi^2) + \omega_0^2 \cdot R'^2}$  – початкові швидкості метання, відповідно на радіусі  $R_{\text{унн}}$  та  $R'$ ;  $H_{\hat{e} i \hat{d} p_1}$ ,  $H_{\hat{e} i \hat{d} p_2}$  – вертикальні координати точок початку метання ґрунту (рис. 4).

Баланс потужності ШІ при засипці траншеї має наступний вигляд :

$$\sum N = N_{\hat{d} . \hat{d} .} + N_{\hat{d} . \hat{a} .} + N_{\hat{i}} + N_{\hat{d} . \hat{e} .} + N_{\hat{d} . \hat{a} .}, \quad (16)$$

де  $N_{\hat{d} . \hat{d} .} = \hat{I}_{\hat{d} .} \cdot \gamma \cdot \omega_0^2 \cdot R_{\hat{n} . \hat{n} . \hat{d} .}^2 / 2000$  – потужність, що витрачається на розгін ґрунту у радіальному напрямі;  $\hat{I}_{\hat{d} .} = \hat{I}_{\hat{e} .}^2 \cdot \mathcal{G}_i \cdot \operatorname{ctg} \varphi_0$  – технічна продуктивність, м<sup>3</sup>/с;  $N_{\hat{d} . \hat{a} .} = \hat{I}_{\hat{d} .} \cdot \gamma \cdot \mathcal{G}_a^2 / 2000$  – потужність, що витрачається на розгін ґрунту в осьовому



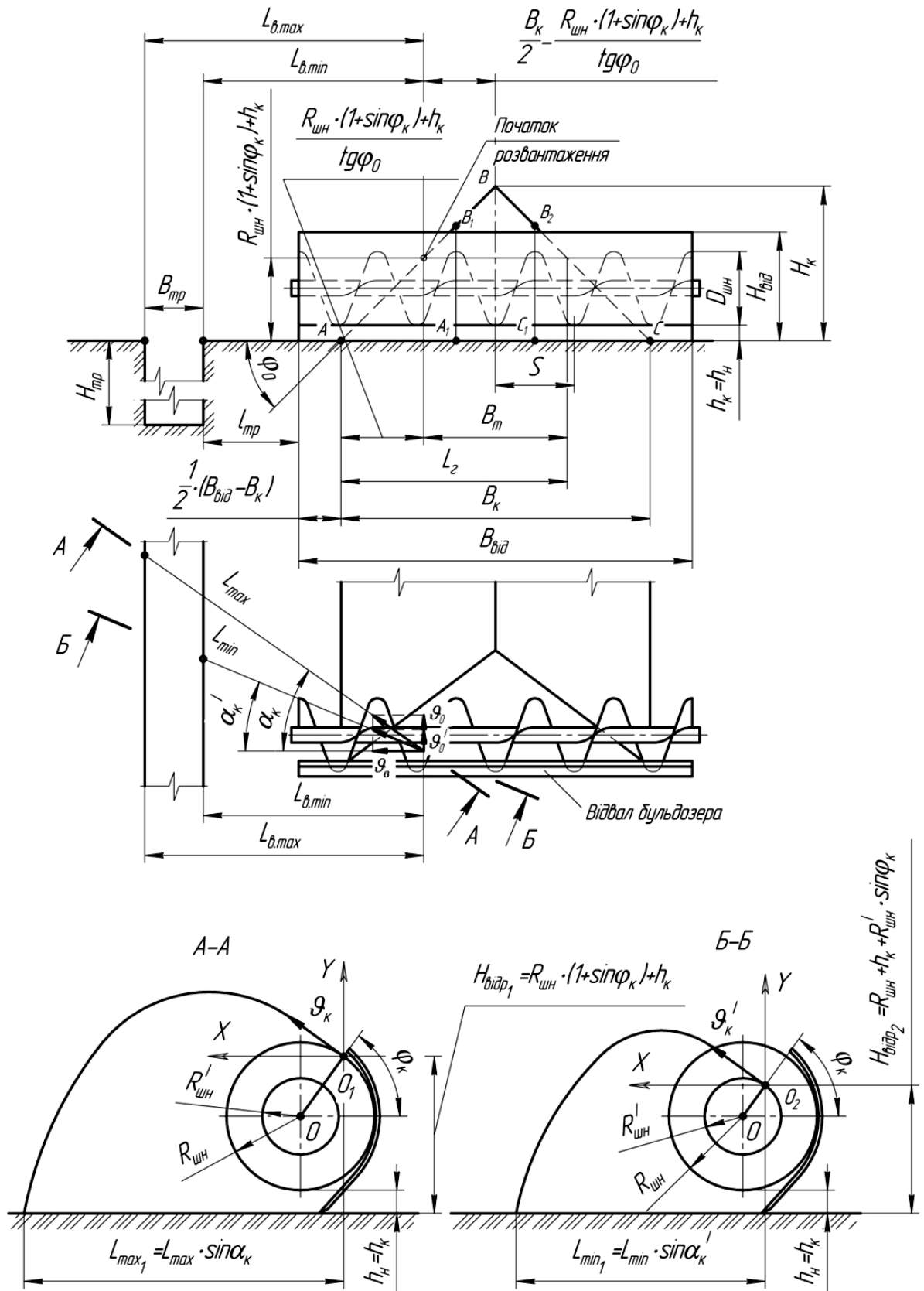


Рис. 4. Розрахункова схема для визначення критичної кутової швидкості обертання ШІ та відстані вільного транспортування ґрунту ШІ при переміщенні кавальєру.

напрямі;  $N_{\dot{\gamma}} = \dot{I}_{\delta} \cdot g \cdot \gamma \cdot (R_{\phi i} + R_{\bar{n}, \bar{n}\delta} \cdot \sin \varphi_e) / 1000$  – потужність, що витрачається на підйом ґрунту;  $N_{\delta, e} = F_{\bar{n}\delta} \cdot (1,5 \cdot \pi - \varphi_e) \cdot R_{\bar{n}, \bar{n}\delta}^2 \cdot \omega_0^2 \cdot \text{tg} \rho \cdot Z_a \cdot \gamma \cdot [R_{\bar{n}, \bar{n}\delta} \cdot \omega_0 + \mathcal{G}_a] / \{1000 \cdot \cos \alpha_{c, \bar{n}\delta}\}$  – потужність, що витрачається на подолання сил тертя ґрунту по поверхні кавальєру;  $Z_a = \hat{A}_e / S$  – кількість витків ШІ, які взаємодіють із ґрунтом кавальєру;  $N_{\delta, a} = F_{\bar{n}\delta} \cdot (0,5\pi + \varphi_e) \cdot R_{\bar{n}, \bar{n}\delta}^2 \cdot \omega_0^2 \cdot \text{tg} \delta \cdot Z_a \cdot \gamma \cdot [R_{\bar{n}, \bar{n}\delta} \cdot \omega_0 + \mathcal{G}_a] / \{1000 \cdot \cos \alpha_{\bar{n}, \bar{n}\delta}\}$  – потужність, що витрачається на подолання сил тертя ґрунту по поверхні відвала.

Крутний момент на привідному валу ШІ визначаємо за формулою (8), а енергоємність робочого процесу засипки траншеї згідно (9).

Метою проведених експериментальних досліджень являлось встановлення фізичної сутності бічного транспортування ґрунту ШІ (рис. 5) на РО бульдозера (рис. 6) при копанні ґрунту та засипці траншей, визначення впливу наступних параметрів: при копанні ґрунту – частоти обертання привідного вала ШІ  $n_{\phi i}$ , швидкості моделі  $\mathcal{G}_m$ , міцності ґрунту  $\tilde{N}_{\phi a}$ , кроку навивки ШІ  $S$ ; при засипці траншей – частоти обертання привідного вала ШІ  $n_{\phi i}$ , швидкості моделі  $\mathcal{G}_i$ , висоти кавальєру  $\hat{I}_e$ ; зовнішнього діаметра ШІ  $D_{\phi i}$  на величину середнього крутного моменту  $\dot{I}_{\delta\delta, \bar{n}\delta}$  та енергоємність  $E$  робочого процесу. А також підтвердження теоретичних розрахунків та прийнятих допущень.

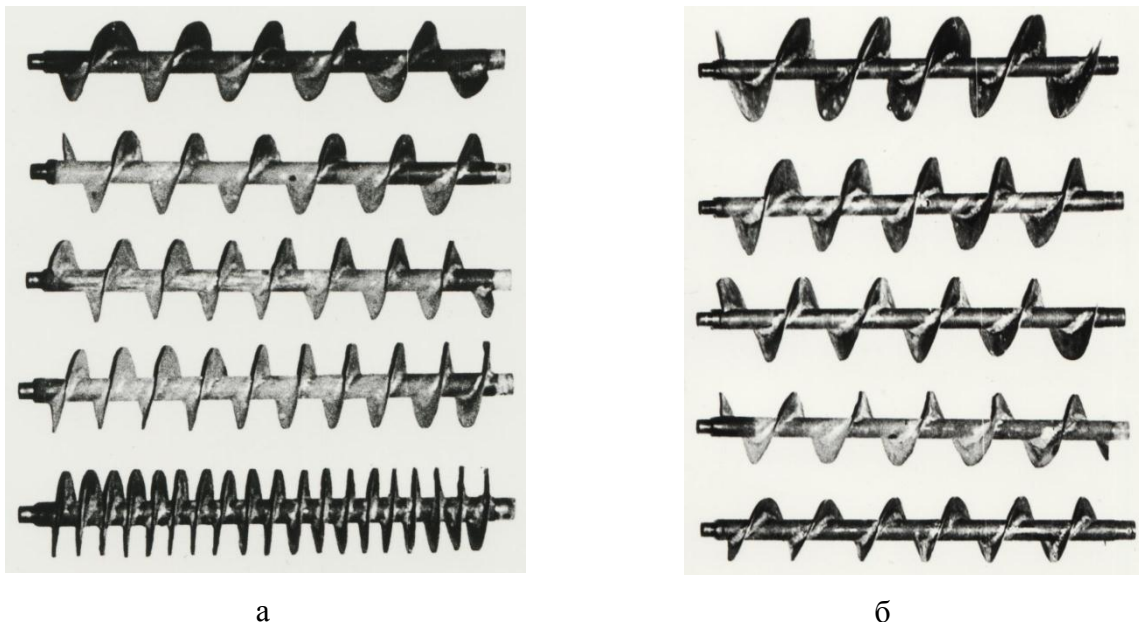


Рис. 5. Моделі ШІ для проведення багатофакторних експериментів : а – для копання ґрунту; б – для засипки траншей.

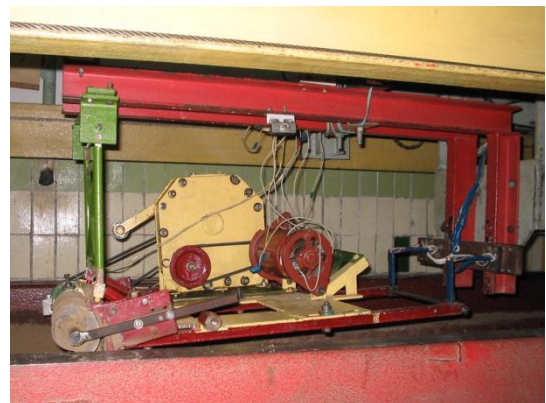
Для проведення дослідів використано метод багатофакторного планування експериментів, а саме: рототабельний центральний композиційний план другого

порядку для 4-х факторів з довірчою ймовірністю 0,95. Цей план найбільш повно описує процес бічного транспортування ґрунту ШІ на РО бульдозера. В якості функцій відгуку приймалися середній крутний момент  $\dot{I}_{\text{ед.пд}}$  та енергоємність  $E$  робочого процесу.

За умовами проведення експериментальних досліджень та подальшого аналізу визначено фактори, що варіювались: *при копанні ґрунту*:  $\tilde{O}_1$  – частота обертання ШІ,  $n_{\text{шн}}$ ;  $\tilde{O}_2$  – швидкість моделі,  $\mathcal{G}_m$ ;  $\tilde{O}_3$  – міцність ґрунту,  $C_{y\theta}$ ;  $\tilde{O}_4$  – крок навивки ШІ  $S$ ; *при засипці траншеї*:  $\tilde{O}_1$  – частота обертання ШІ,  $n_{\text{шн}}$ ;  $\tilde{O}_2$  – швидкість моделі,  $\mathcal{G}_m$ ;  $\tilde{O}_3$  – висота кавальєру,  $\dot{I}_e$ ;  $\tilde{O}_4$  – зовнішній діаметр ШІ,  $D_{\phi i}$ .



а



б



в



г

Рис. 6. Фізична модель відвала з ШІ на стенді для фізичного моделювання робочих процесів ЗТМ: а – вид спереду; б – вид збоку; в – процес копання ґрунту; г – процес засипки траншеї.

На основі розроблених математичних моделей отримано графічні залежності середнього крутного моменту  $M_{\text{кр.ср}}$  на привідному валу ШІ та енергоємності

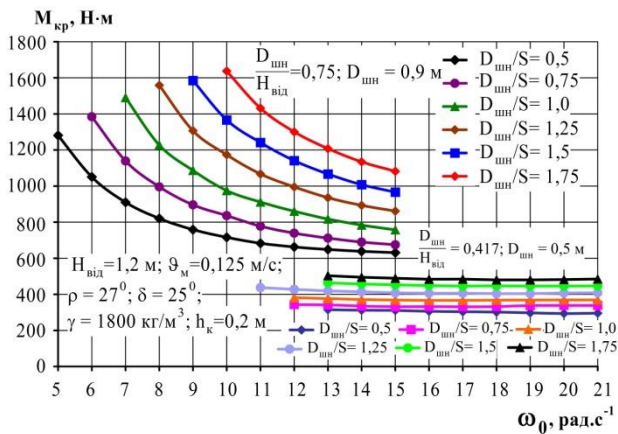
робочого процесу від факторів, що варіювались для копання ґрунту (рис. 7, а, б) і для засипки траншей (рис. 7, в, г).

Після обробки осцилограм, отриманих на основі плану експерименту, сформовано числовий масив даних для функції відгуку  $M_{кр.ср}$  та  $E$ .

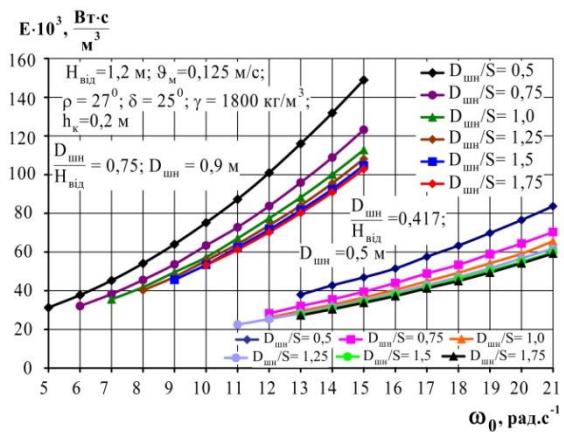
Математична обробка результатів дозволила отримати регресійні залежності моделі:

1. Для копання ґрунту :

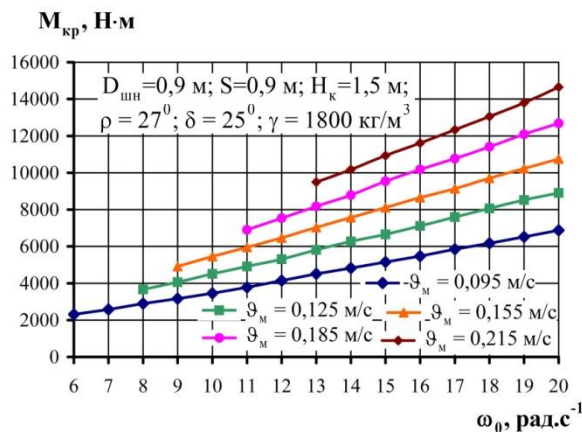
– рівняння середнього крутного моменту  $\dot{I}_{\text{ср.н.д}} = f(n, \vartheta_i, \tilde{N}_{\text{оа}}, S)$  :



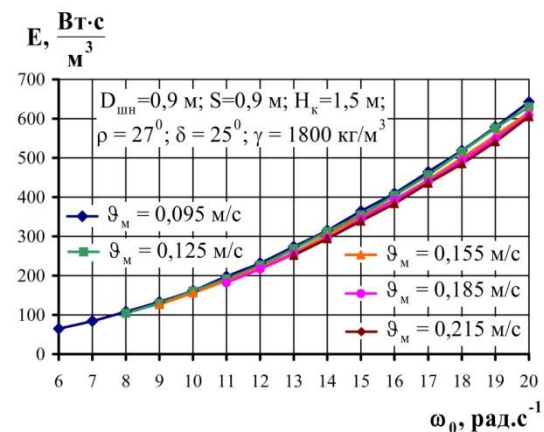
а



б



в



г

Рис. 7. Залежність крутного моменту  $M_{кр}$  на валу ШП та енергоємності  $E$  робочого процесу: а, б – копання ґрунту; в, г – засипка траншей.

$$\begin{aligned} \dot{I}_{\text{ср.н.д}} = & 2,654 - 0,0291 \cdot n + 36,05 \cdot \vartheta_i + 0,219 \cdot \tilde{N}_{\text{оа}} - 35,5 \cdot S - \\ & - 0,00081 \cdot n \cdot \tilde{N}_{\text{оа}} + 0,044 \cdot n \cdot S + 0,000082 \cdot n^2 - 125 \cdot \vartheta_i^2; \end{aligned} \quad (17)$$

– рівняння енергоємності  $\dot{A} = f(n, \vartheta_i, \tilde{N}_{\text{оа}}, S)$  :

$$\dot{A} = 139 - 0,262371 \cdot n - 1136,26 \cdot \vartheta_i + 2,272 \cdot \tilde{N}_{\text{оа}} - 1654,92 \cdot S -$$

$$-2,852 \cdot n \cdot S + 19074 \cdot \mathcal{G}_i \cdot S + 0,0022705 \cdot n^2. \quad (18)$$

2. Для засипки траншей :

– рівняння середнього крутного моменту  $M_{кр.сп} = f(n, \mathcal{G}_M, H_K, D_{шн})$  :

$$\begin{aligned} \dot{I}_{\dot{\delta}\delta.\dot{n}\dot{\delta}} = & 7,7122344 - 0,02391 \cdot n - 58,086 \cdot \mathcal{G}_i - 46,42 \cdot \dot{I}_{\dot{\epsilon}} - 93,386 \cdot D_{\phi i} + \\ & + 0,092 \cdot n \cdot \mathcal{G}_i + 0,0778 \cdot n \cdot \dot{I}_{\dot{\epsilon}} + 0,0882 \cdot n \cdot D_{\phi i} + 357,35 \cdot \mathcal{G}_i \cdot \dot{I}_{\dot{\epsilon}} + \\ & + 360,3 \cdot \mathcal{G}_i \cdot D_{\phi i} + 466,1 \cdot \dot{I}_{\dot{\epsilon}} \cdot D_{\phi i} + 0,000024 \cdot n^2 + 247,7 \cdot D_{\phi i}^2. \end{aligned} \quad (19)$$

– рівняння енергоємності  $E = f(n, \mathcal{G}_M, H_K, D_{шн})$  :

$$\begin{aligned} \dot{A} = & 130,3914 - 1,10777 \cdot n - 1990,77 \cdot \mathcal{G}_i + 154,2825 \cdot \dot{I}_{\dot{\epsilon}} - 684,78772 \cdot D_{\phi i} + \\ & + 9,3478 \cdot n \cdot D_{\phi i} + 0,0022 \cdot n^2 + 19907,7 \cdot \mathcal{G}_i^2 - 219,856 \cdot \dot{I}_{\dot{\epsilon}}^2 + 182,217 \cdot D_{\phi i}^2. \end{aligned} \quad (20)$$

За результатами експериментів розглянуто характер впливу параметрів на процес бічного транспортування ґрунту ШІ на РО бульдозера й визначені закономірності, що описують процес (рис. 8, 9).

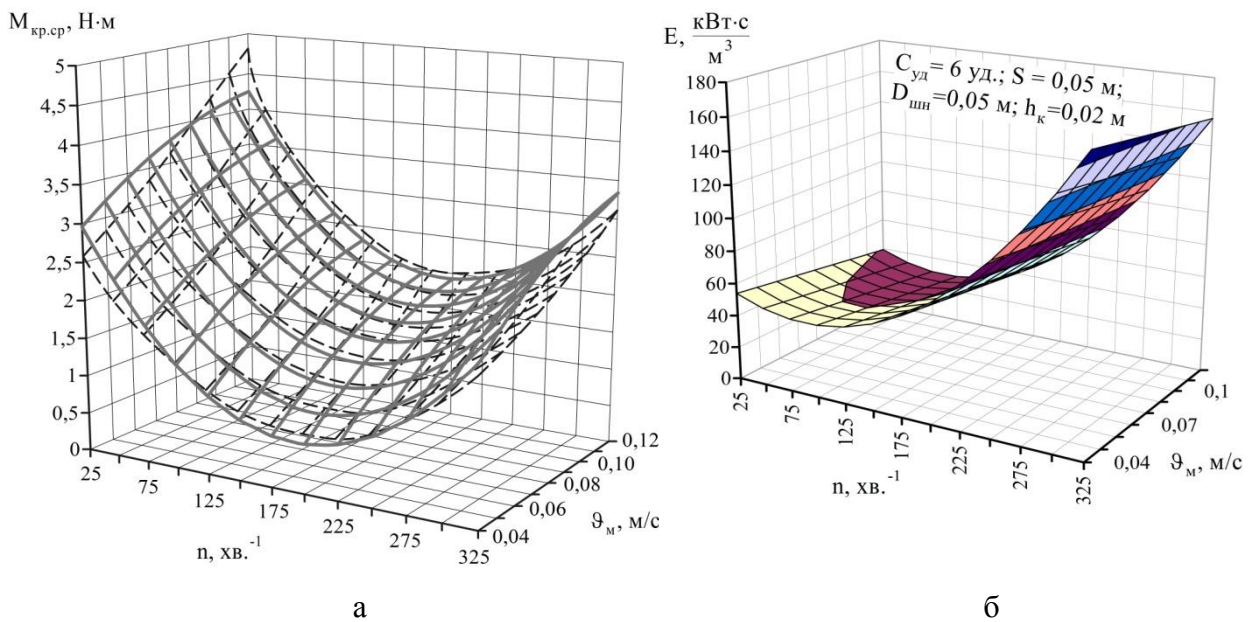


Рис. 8. Графіки залежності: а – крутного моменту  $M_{кр.сп}$ ; б – енергоємності  $E$  при копанні: - - - - теоретична залежність; — експериментальна залежність.

Базуючись на аналізі теоретичних та експериментальних досліджень розроблено методику інженерного розрахунку ШІ на РО бульдозера. Вихідними даними до розрахунку є технічна характеристика базової машини (тяговий клас  $T_M$ ; потужність двигуна  $N_{\delta\epsilon}$ ; швидкість копання  $\mathcal{G}_M$ ; ширина відвалу  $B_{\epsilon id}$ ; висота відвала  $H_{\epsilon id}$ ), фізико-механічні властивості ґрунту (зчеплення ґрунту  $C_W$ ; щільність ґрунту у природному заляганні  $\gamma$ ; коефіцієнт розпушення ґрунту  $K_p$ ; кут внутрішнього тертя

$\rho$ ; кут зовнішнього тертя  $\delta$ ) та технологічні умови щодо облаштування траншей та їх засипці при прокладці магістральних трубопроводів.

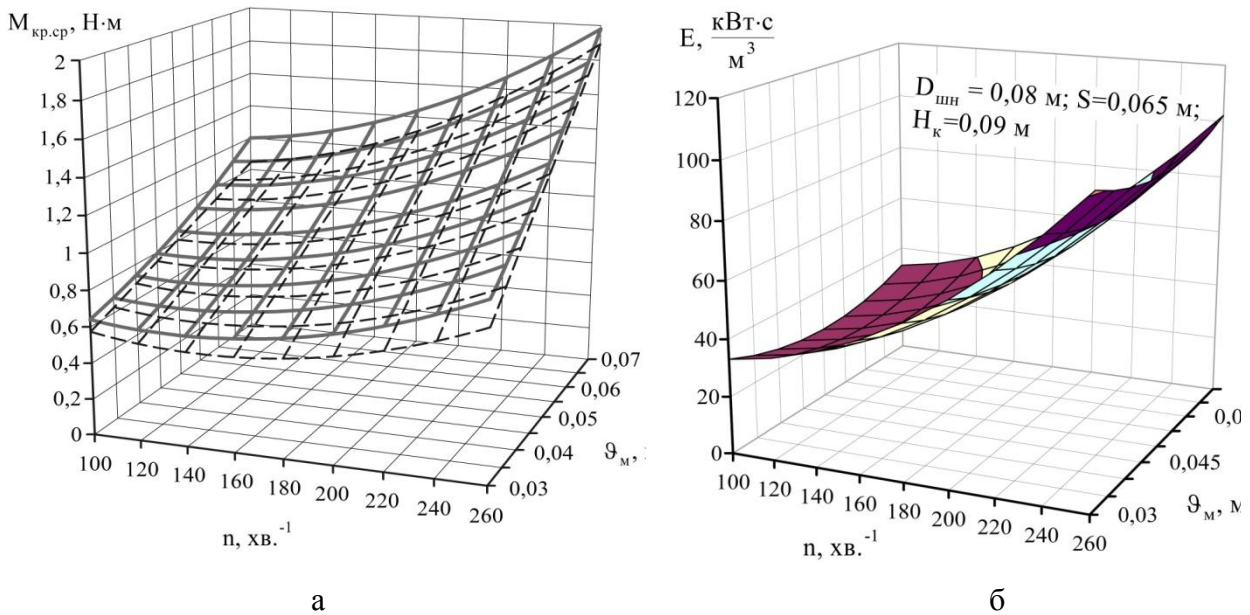


Рис. 9. Графіки залежності крутного моменту  $M_{кр.сп}$  та енергоємності  $E$  при засипці: - - - - теоретична залежність; ——— експериментальна залежність.

Результати оцінки ефективності використання бульдозера з ШІ представлено у таблиці 1.

Таблиця 1

Показники ефективності використання бульдозера з ШІ

№ п/п	Показник	Од. вим.	Значення		
			Бульдозер ДЗ-90С (неповоротний)	Бульдозер ДЗ-28 (поворотний)	Бульдозер ДЗ-171.1 з ШІ
1	2	3	4	5	6
1.	Продуктивність, $P_{екс}$	м <sup>3</sup> /год	163,146	630,72	777,6
2.	Енергоємність, $E_{нит}$	кВт·г/м <sup>3</sup>	0,723	0,187	0,166
3.	Матеріалоємність, $G_{нит}$	кг·г/м <sup>3</sup>	101,14	26,24	24,28
4.	Собівартість машино-години, $C_{м-г}$	грн./маш.год.	652,524	653,263	658,644
5.	Собівартість одиниці продукції, $Z_{II}$	грн./м <sup>3</sup>	5,95	1,54	1,26

Основні формули для визначення раціональних параметрів бульдозера з ШІ представлено в таблиці 2.

Таблиця 2

Основні формули для визначення раціональних параметрів ШІ на РО бульдозера

№ з/п	Найменування параметра	Без ходосповідільнювача		Із ходосповідільнювачем	
		Копання ґрунту	Засипка траншеї	Копання ґрунту	Засипка траншеї
1	2	3	4	5	6
1	Швидкість руху бульдозера $\mathcal{Q}_M$ , м/с	0,5...0,65		0,095...0,155	
2	Товщина стружки, що вирізається, м	0,15...0,2	—	0,15...0,2	—
3	Діаметр ШІ $D_{шн}$ , м	$(0,75...0,83)H_{від}$	$(0,67...0,75)H_{від}$	$(0,75...0,83)H_{від}$	$(0,67...0,75)H_{від}$
4	Співвідношення $\frac{D_{шн}}{S}$	0,75...1,0	1,0...1,25	0,75...1,0	1,0...1,25
5	Діаметр привідного вала $d_e$ , м	$d_e = \frac{S}{\pi \cdot \operatorname{tg}(90^\circ - \delta)}$			
6	Довжина ШІ $L_{шн}$ , м	$L_{шн} = B_{від}$			
7	Кутова швидкість $\omega_0$ , рад.с <sup>-1</sup>	9...12	10...12	6...8	10...12
8	Середня відстань осьового зміщення ґрунту $L_{в.ср}$ , м	пояснення формули (2)	—	пояснення формули (2)	—
9	Максимальна відстань метання ґрунту $L_{max}$ , м	—	формула (14)	—	формула (14)
10	Мінімальна відстань метання ґрунту $L_{min}$ , м	—	формула (15)	—	формула (15)
11	Висота кавальєру $H_k$ , м	—	$(0,62...0,67)H_{від}$	—	$1,25 \cdot H_{від}$

1	2	3	4	5	6
12	Технічна продуктивність $P_m, \text{м}^3/\text{с}$	пояснення формули (4)	пояснення формули (16)	пояснення формули (4)	пояснення формули (16)
13	Загальна потужність на привід ШІ, кВт	формула (4)	формула (16)	формула (4)	формула (16)
14	Крутний момент, Н·м	формула (8)			
15	Енергоємність робочого процесу ШІ, Вт·с/м <sup>3</sup>	формула (9)			

### Висновки.

1. Аналіз наукових та технічних рішень РО бульдозерів, які мають призначення бічного транспортування ґрунту при копанні та засипці траншей, виявив, що для одночасного різання і транспортування ґрунту або в якості зовнішніх транспортуючих пристроїв ґрунту використовуються гвинтові робочі органи з осьовим напрямом транспортування ґрунту, які, при виключно осьовому переміщенні ґрунту знижують продуктивність і підвищують енергоємність.

2. Запропоновано перспективне РО бульдозера, обладнаного відвалом з ШІ, яке виконує метання ґрунту під кутом  $\alpha_k = 60^0 \dots 70^0$  до напрямку руху базової машини та забезпечує бічне транспортування ґрунту при копанні та засипці траншей.

3. Вперше отримано математичні моделі для визначення геометричних параметрів відвала бульдозера з ШІ, кута відриву ґрунту від гвинтової поверхні ШІ та кута захвату ґрунту ШІ, мінімальної кутової швидкості обертання, середньої відстані осьового зміщення ґрунту при копанні, максимальної та мінімальної відстані метання ґрунту при засипці траншей.

4. Вперше встановлено методом фізичного моделювання закономірності взаємодії РО бульдозера, що обладнано ШІ ( $D_{\text{шн}} = 0,85 \dots 0,9 \text{ м}$ ) з ґрунтом та вплив режимів роботи ШІ на фізичну картину бічного транспортування ґрунту, що визначаються частотою обертання, яку умовно можна поділити на докритичну ( $n \leq 25 \dots 50 \text{ хв.}^{-1}$ ), критичну ( $n = 55 \dots 90 \text{ хв.}^{-1}$ ) та закритичну ( $n > 90 \text{ хв.}^{-1}$ ), при якій відбувається відрив ґрунту від гвинтової поверхні ШІ та його транспортування у бічному напрямі в режимі метання.

5. Встановлено характер транспортування ґрунту, який складається з двох етапів:



транспортування ґрунту в зоні його контакту із лобовою поверхнею відвала із осьюовою і радіальною швидкістю; транспортування ґрунту за рахунок вільного польоту ґрунту з початком траєкторії вільного транспортування на рівні верхньої кромки відвальної поверхні, що характеризується кутом відриву  $\varphi_k = 52^0 \dots 60^0$ .

6. Для закритичного режиму роботи ШІ розроблені, з використанням теорії сипкого середовища та теорії транспортування ґрунту гвинтовими поверхнями, математичні моделі для визначення параметрів бічного транспортування ґрунту, силових та енергетичних показників робочого процесу в залежності від геометричних параметрів ШІ, умов взаємодії з ґрунтом, фізико–механічних характеристик ґрунту при виконанні технологічних процесів пошарового копання ґрунту та засипці траншей.

7. На основі сформованих математичних моделей визначено інтервали раціональних значень за умови мінімальної енергоємності робочого процесу і забезпечення технології виконуваних робіт: співвідношення діаметра й кроку  $D_{шн}/S = 0,9 \dots 1,0$ ; довжина ШІ  $L_{шн} = B_{від}$ ; кутова швидкість обертання ШІ  $\omega_0 = 9 \dots 12 \text{ рад}\cdot\text{с}^{-1}$ ; без ходосповільнювача максимальна висота кавальєру складає  $H_k \leq (0,62 \dots 0,67) \cdot H_{від}$ ; із ходосповільнювачем –  $H_k \leq 1,25 \cdot H_{від}$ .

8. За допомогою експериментальних досліджень фізичних моделей відвала бульдозера з ШІ отримано чотирьохфакторні регресійні рівняння залежності крутного моменту  $M_{кр}$  на привідному валу ШІ та енергоємності  $E$  при копанні (частота обертання привідного вала ШІ  $n_{шн}$ , швидкість моделі  $\mathcal{G}_m$ , міцність ґрунту  $C_{yd}$ , крок навивки ШІ  $S$ ) і засипці траншей (частота обертання привідного вала ШІ  $n_{шн}$ , швидкість моделі  $\mathcal{G}_m$ , висота кавальєру  $H_k$ ; зовнішній діаметр ШІ  $D_{шн}$ ), в яких розбіжність між теоретичними і експериментальними значеннями крутного моменту на привідному валу ШІ не перевищує 10–14 % при копанні ґрунту, 10–12 % при засипці траншей.

9. Розроблено математичні моделі розрахунку бульдозерів з ШІ для випадків копання ґрунту та засипки траншей, що враховують наявність або відсутність ходосповільнювача на базовій машині, які покладено в основу інженерного розрахунку бульдозера з ШІ.

10. На основі порівняльного аналізу техніко-економічної ефективності бульдозера, обладнаного ШІ при виконанні засипки траншей було встановлено, що бульдозер ДЗ-171.1 з ШІ у порівнянні з бульдозером ДЗ-90С при човниковій схемі засипки має

більшу експлуатаційну продуктивність у 4,77 рази, меншу питому енергоємність у 4,36 рази та матеріалоємність, меншу у 4,17 рази; у порівнянні з бульдозером ДЗ-28 при безперервній схемі засипки має більшу експлуатаційну продуктивність у 1,23 рази, меншу питому енергоємність у 1,13 рази та матеріалоємність, меншу у 1,08 рази; встановлено можливість отримання очікуваного річного економічного ефекту при порівнянні бульдозера ДЗ-28 із поворотним відвалом та бульдозера ДЗ-171.1 із ШІ при засипці траншеї у розмірі 156 225,4 грн.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Севастьянов К.М. Исследование энергоёмкости процесса экскавации торфа из залежи горизонтальными шнек-фрезами. / Автореф. дис. канд. техн. наук. – Калинин: КПИ, 1973. – 23 с.

2. Зенков Р.Л. Машины непрерывного транспорта / Зенков Р.Л. – 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 / Баловнев В.И., Шкрыль В.Н. // Строительные и дорожные машины, №4, 1978. – С. 24-26.

5. Хмара Л. А. Визначення геометричних залежностей шнекового інтенсифікатора на робочому обладнанні бульдозера / Л. А. Хмара, Р. М. Кроль // Вісник придніпровської державної академії будівництва та архітектури № 12. – Дніпропетровськ: ПДАБА, 2005. – С. 37–45.

6. Хмара Л. А. Отвал бульдозера с винтошнековым интенсификатором / Л. А. Хмара, Р. Н. Кроль // Журнал «Строительные и дорожные машины», 2009 – № 9. – С. 30–33.

7. Хмара Л. А. Экспериментальное и теоретическое исследование бульдозера с винтошнековым интенсификатором / Л. А. Хмара, Р. Н. Кроль // Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини. – Вип. 71. – К.: КНУБА, 2008. – С. 80–86.

8. 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 // Строительство. Материаловедение. Машиностроение. – Вип. 26. – Днепропетровск: ПГАСА, 2004. – С. 57–66.

9. Хмара Л. А. Теоретичне дослідження закономірності руху частки ґрунту по гвинтовій поверхні шнекового інтенсифікатора / Л. А. Хмара, Р. М. Кроль // Вісник

НУВГП. – Вип. 2 (34). Ч. 2. – Рівне, 2006. – С. 175–181.

10. Кроль Р. М. Визначення значення абсолютної швидкості частки ґрунту, що транспортується шнековим інтенсифікатором / Р. М. Кроль // *Строительство. Материаловедение. Машиностроение.* – Вип. 51. – Днепропетровск: ПГАСА, 2009. – С. 74–80.

11. Кроль Р. М. Теоретичне дослідження зворотної засипки траншей бульдозером, що обладнано шнековим інтенсифікатором / Р. М. Кроль // *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури.* – № 4. – Дніпропетровськ: ПДАБА, 2013. – С. 35–43.

12. Хмара Л. А. Про експериментальне дослідження шнекових інтенсифікаторів на робочому обладнанні бульдозера / Л. А. Хмара, Р. М. Кроль // *УкрДАЗТ,* 2002. – Вип. 50. – С. 5–10.

13. Хмара Л. А. Теоретическое и экспериментальное исследование рабочего бульдозера с шнековым интенсификатором / Л. А. Хмара, Р. Н. Кроль // *Механизация строительства,* 2003. – № 7. – С. 13–16.

**УДК 621.225:69.002.51**

**Л. А. ХМАРА, докт. техн. наук.**

*ГВУЗ «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры»*

**А. П. ХОЛОДОВ, канд. техн. наук.**

*Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет*

**АККУМУЛИРОВАНИЕ ЭНЕРГИИ В РАБОЧЕМ ПРОЦЕССЕ  
ЗЕМЛЕРОЙНО-ТРАНСПОРТНЫХ МАШИН С ЦЕЛЬЮ ПОВЫШЕНИЯ ИХ  
ЭФФЕКТИВНОСТИ**

**Введение.** В эпоху прогрессирующего энергетического кризиса все больший интерес вызывает возможность снизить расход топлива при заданной производительности машины или же повысить производительность при заданном расходе топлива. Особенно учитывая тот факт, что наибольшие затраты при эксплуатации дорожно-строительной техники – это затраты на нефтепродукты (рис. 1).