

УДК 621.879.33

КОΠΑННЯ ҐРУНТУ ОДНОКІВШЕВИМ ЕКСКАВАТОРОМ ІЗ ТЕЛЕСКОПІЧНИМ РОБОЧИМ ОБЛАДНАННЯМ

ХМАРА Л. А. ^{1*}, *д. т. н., проф.*,
ДАХНО О. О. ², *асп.*

^{1*} Кафедра будівельних і дорожніх машин, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, Дніпро, 49600, Україна, тел. +38 (093) 267-03-86, e-mail: leonidkhmara@yahoo.com, ORCID ID: 0000-0003-3050-9302

² Кафедра будівельних і дорожніх машин, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, Дніпро, 49600, Україна, тел. +38 (066) 044-84-48, e-mail: olegdakhno@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-6916-4327

Анотація. Постановка проблеми. Виконання землерийних робіт пов'язане низкою специфічних особливостей, які обмежують використання повною мірою технологічних можливостей робочого обладнання (РО) одноківшевого гідравлічного екскаватора (ОГЕ) та ефективність використання землерийної техніки. Таким чином, виникає потреба змінювати робочі траєкторії руху робочого органа в процесі копання. Традиційне РО має вузький діапазон зміни геометричних параметрів. У зв'язку із цим виникає потреба в розширенні технологічних можливостей РО ОГЕ за рахунок можливості активної зміни геометричних параметрів РО у процесі копання, що дозволить адаптувати товщину вирізаної ґрунтової стружки до властивостей відповідної категорії ґрунту. Широкого діапазону зміни геометричних параметрів РО можливо досягти застосуванням телескопічного робочого обладнання (ТРО), що дозволяє плавно і з високою точністю змінювати геометричні та силосі параметри обладнання, а також використовувати широкий спектр змінних робочих органів. **Мета статті** – розробити оптимізаційну математичну модель для визначення оптимальної товщини вирізаної стружки в умовах забезпечення стійкості та максимально можливих зусиль на різальній кромці ковша під час копання ОГЕ зі змінними геометричними параметрами РО, в якому зміна параметрів відбувається за рахунок застосування телескопічних механізмів стріли та рукояті. **Висновок.** Наведені оптимізаційні математичні моделі для визначення максимально можливої товщини вирізаної стружки під час копання ТРО ОГЕ дозволили досягти моделювання заданої категорії ґрунту підтриманням постійного значення питомого опору копанню ґрунту через регулювання товщини ґрунтової стружки для забезпечення стійкості та максимально допустимого зусилля копання. Наведені оптимізаційні графіки для руху по градієнтній траєкторії з розрахунковою товщиною ґрунтової стружки для зміни ординати шарніру кріплення рукояті, зміни довжини телескопічної частини стріли та зміни довжини телескопічної рукояті від зміни кута повороту телескопічної рукояті показують коректність моделей. Впровадження і використання цих математичних моделей дозволить зменшити енергоємність процесу копання та підвищити продуктивність ОГЕ.

Ключові слова: одноківшевий екскаватор; телескопічне робоче обладнання; оптимізація; копання ґрунту

КОПАНИЕ ҐРУНТА ОДНОКОВШОВЫМ ЭКСКАВАТОРОМ С ТЕЛЕСКОПИЧЕСКИМ РОБОЧИМ ОБОРУДОВАНИЕМ

ХМАРА Л. А. ^{1*}, *д. т. н., проф.*,
ДАХНО О. А. ², *асп.*

^{1*} Кафедра строительных и дорожных машин, Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, Днепр, 49600, Украина, тел. +38 (093) 267-03-86, e-mail: leonidkhmara@yahoo.com, ORCID ID: 0000-0003-3050-9302

² Кафедра строительных и дорожных машин, Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, Днепр, 49600, Украина, тел. +38 (066) 044-84-48, e-mail: olegdakhno@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-6916-4327

Аннотация. Постановка проблемы. Производство земляных работ связано с рядом специфических особенностей, которые ограничивают использование в полной мере технологических возможностей рабочего оборудования (РО) одноковшового гидравлического экскаватора (ОГЭ) и эффективность использования землеройной техники. Таким образом, возникает необходимость изменять рабочие траектории движения рабочего органа в процессе копания. Традиционное РО имеет узкий диапазон изменения геометрических параметров. В связи с этим возникает потребность в расширении технологических возможностей РО ОГЭ за счет возможности активного изменения геометрических параметров РО в процессе копания, что позволит адаптировать толщину вырезанной ґрунтовой стружки к свойствам соответствующей категории ґрунта. Широкий диапазон изменения геометрических параметров РО возможно достичь применением телескопического рабочего оборудования (ТРО), что позволяет плавно и с высокой точностью изменять геометрические и силовые параметры оборудования, а также использовать широкий спектр сменных рабочих органов. **Цель статьи** – разработать оптимизационную математическую модель для определения оптимальной толщины вырезаемой стружки в

умовляючи забезпечення стійкості і максимально можливих зусиль на режущей кромке ковша при копанні ОГЭ з змінюваними геометричними параметрами РО, в якому зміна параметрів відбувається за рахунок застосування телескопічних механізмів стріли і рукояті. **Висновок.** Приведені оптимізаційні математичні моделі для визначення максимально можливої товщини вирізаного стружки при копанні ТРО ОГЭ дозволили досягти моделювання заданої категорії ґрунту підтримкою постійного значення удільного опору ґрунту копанню через регулювання товщини ґрунтової стружки при забезпеченні стійкості і максимально допустимого зусилля копання. Представлені оптимізаційні графіки для руху по градієнтній траєкторії з розрахунковою товщиною ґрунтової стружки для зміни ординати шарніра кріплення рукояті, зміни довжини телескопічної частини стріли і зміни довжини телескопічної рукояті від зміни кута повороту телескопічної рукояті показують коректність моделей. Впровадження і використання представлених математичних моделей дозволить зменшити енергоємність процесу копання і підвищить продуктивність ОГЭ.

Ключові слова: одноковшовий екскаватор; телескопічне робоче обладнання; оптимізація; копання ґрунту

GROUND DIGGING PROCESS BY EXCAVATOR EQUIPPED WITH TELESCOPIC WORKING EQUIPMENT

KHMARA L.A. ^{1*} *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*
DAKHNO O.O. ², *postgraduate*

^{1*} Department of Building and road machines. State Higher Educational Establishment "Prydniprov'ska State Academy of Civil Engineering and Architecture", Chernyshevskogo str., 24-a, Dnipro, 49600, Ukraine, tel. +38 (093) 267-03-86, e-mail: leonidkhmara@yahoo.com, ORCID ID: 0000-0003-3050-9302

² Department of Building and road machines. State Higher Educational Establishment "Prydniprov'ska State Academy of Civil Engineering and Architecture", Chernyshevskogo str., 24-a, Dnipro, 49600, Ukraine, tel. +38 (066) 044-84-48, e-mail: olegdakhno@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-6916-4327

Abstract. Raising of problem. Production of excavation associated with a number of specific features, which restrict the full use of the technological possibilities of the working equipment, single-bucket hydraulic excavator and the efficient use of earth-moving equipment. Thus, it becomes necessary to change the working trajectory of movement the working body in the course excavation. Traditional working equipment has a narrow range of variation of geometrical parameters. In this regard, there is need to expand the technological capabilities of the excavator working equipment due to the possibility of the active changing the geometric parameters of working equipment in the process of excavation, which helps to adapt the thickness of the shavings cut ground to the properties of the corresponding category of ground. A wide range of changes in the geometric parameters of the working equipment can be achieved using of the telescopic working equipment, which allows you to change smoothly and highly accurately the geometrical and power parameters of the equipment, as well as use a wide range of interchangeable working bodies. **The purpose of the article.** To develop an optimization mathematical model for determining the optimal thickness of cut shavings in terms of sustainability and the maximum possible effort at the cutting edge of the bucket, when digging excavator with variable geometric parameters of the working equipment, in which the change of parameters is due to the use of telescopic boom and arm mechanisms. **Conclusion.** Presented optimization mathematical models to determine the maximum shaving thickness cut, while digging by telescopic working equipment of excavator have allowed to achieve modeling a given category of ground maintaining constant value ground resistivity digging through the ground shaving thickness adjustment, while ensuring the maximum stability and digging force. It are submitted the optimization graphics for the motion on gradient calculated trajectory with effective thickness of ground shaving to change hinge ordinates of the handle attachment, length changes of the telescopic boom and length changes the of a telescopic handle from the turning angle changes of the telescopic handle indicate correct models. Implementation and use of the mathematical model will reduce energy consumption of the process and increase productivity of the digging excavator.

Keywords: excavator; telescopic working equipment; optimization; ground digging

Постановка проблеми

Виконання землерийних робіт пов'язане з низкою специфічних особливостей, які обмежують використання повною мірою технологічних можливостей робочого обладнання (РО) однокішшового гідравлічного екскаватора (ОГЕ) та ефективність використання землерийної техніки. Таким чином, виникає потреба змінювати робочі траєкторії руху робочого органу у процесі копання. Традиційне РО має вузький діапазон зміни геометричних параметрів.

У зв'язку із цим виникає потреба в розширенні технологічних можливостей РО ОГЕ за рахунок можливості активної зміни геометричних параметрів РО в процесі копання, що дозволить адаптувати товщину вирізаної ґрунтової стружки до властивостей відповідної категорії ґрунту.

Широкого діапазону зміни геометричних параметрів РО можливо досягти застосуванням телескопічного робочого обладнання (ТРО), що дозволяє плавно і з високою точністю змінювати геометричні та силові параметри обладнання, а також використовувати широкий спектр змінних робочих органів [1–5].

Мета статті

Розробити оптимізаційну математичну модель для визначення оптимальної товщини вирізаної стружки в умовах забезпечення стійкості та максимально можливих зусиль на різальній кромці ковша під час копання однокішневим екскаватором зі змінними геометричними параметрами, в якому зміна параметрів відбувається за рахунок застосування телескопічних механізмів стріли та рукояті.

Основний матеріал

Створення енергоефективних машин пов'язане з визначенням оптимальних траєкторій копання та товщини вирізаної ґрунтової стружки.

Режим навантаження гідромеханізмів РО ОГЕ являє собою випадковий процес, при цьому максимальні опори на робочому органі можуть виникнути в будь-якій точці траєкторії різальної кромки [6–8].

За основу для визначення дотичних опорів ґрунту копанню на різальній кромці ковша приймаємо формулу М. Г. Домбровського:

$$P_{01}^{IP} = K_{IT} bh, \quad (1)$$

де K_{IT} – коефіцієнт питомого опору ґрунту копанню; b, h – ширина та висота вирізаною стружки, відповідно.

Нехай коефіцієнт питомого опору ґрунту копанню є постійним у процесі копання $K_{IT} = const$, а дотична складова опору ґрунту копанню на різальній кромці ковша P_{01}^{IP} дорівнює максимальному зусиллю, яке може створити ТРО в цьому положенні, тоді контролювати категорію ґрунту можна товщиною вирізаної стружки.

Вважаємо товщиною вирізаної стружки h відстань по нормалі в кожній точці M_1 до точки M (рис. 1), тоді рівняння нормалі [6; 7]:

$$Y_{M_1} - Y_M = k^i (X_{M_1} - X_M), \quad (2)$$

де k^i – коефіцієнт нормалі.

$$k^i = \frac{-1}{k} = \frac{-\dot{X}_M(P_h)}{\dot{Y}_M(P_h)}; \quad (3)$$

$$k = \frac{dY_M}{dX_M} = \frac{dP_h}{dX_M} = \frac{\dot{Y}_M(P_h)}{\dot{X}_M(P_h)}, \quad (4)$$

де P_h – аргумент товщини стружки h_{max} , $h_{max} = f(\varphi_1, \varphi_3, L_{T.ЧС}, L_{T.Р}, P_{01}, K_{СТ})$, кути φ_2 та φ_4 вважаємо незмінними в процесі копання рукояттю. Підставимо (3) в (2), тоді рівняння нормалі:

$$Y_{M_1} = Y_M + \frac{\dot{X}_M}{\dot{Y}_M} (X_{M_1} - X_M). \quad (5)$$

Таким чином, товщина вирізаної стружки дорівнюватиме:

$$h = |M'M_1| = \sqrt{(Y_{M_1} - Y_M)^2 + (X_{M_1} - X_M)^2} \quad (6)$$

де (X_{M_1}, Y_{M_1}) – координати точки M_1 , (X_M, Y_M) – координати точки M .

$$X_M = L_{НЧС} \cos \varphi_1 + L_{ТЧС} \cos(\varphi_1 - (\pi - \varphi_2)) + L_{ТР} \cos(\varphi_1 - (\pi - \varphi_2) - (\pi - \varphi_3)) + R_K \cos(\varphi_1 - (\pi - \varphi_2) - (\pi - \varphi_3) - (\pi - \varphi_4)) \quad (7);$$

$$Y_M = L_{НЧС} \sin \varphi_1 + L_{ТЧС} \sin(\varphi_1 - (\pi - \varphi_2)) + L_{ТР} \sin(\varphi_1 - (\pi - \varphi_2) - (\pi - \varphi_3)) + R_K \sin(\varphi_1 - (\pi - \varphi_2) - (\pi - \varphi_3) - (\pi - \varphi_4)) \quad (8).$$

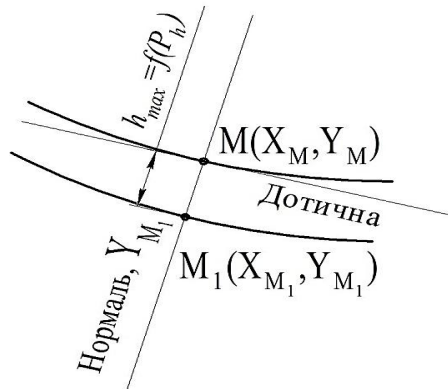


Рис. 1. Схема для визначення максимальної товщини стружки h_{max} / Fig. 1. Diagram for determining the maximum chip thickness h_{max}

Для знаходження умовних екстремумів h_{max} та градієнтної траєкторії в кожній точці копання при зміні кутів $\varphi_1, \varphi_3, \varphi_4$ та довжин телескопічної стріли $L_{T.чс}$ та телескопічної рукояті $L_{T.р}$ розбиваємо траєкторію копання на n, m, l, u та w відрізків, відповідно:

$$\varphi_{1_i} = [\varphi_{1min}, \varphi_{1max}] \left\{ \varphi_{1_i} \parallel R: \varphi_{1min} \leq \varphi_{1_i} \leq \varphi_{1max} \right\}, \quad (9)$$

$$\Delta \varphi_{1_i} = \frac{\varphi_{1max} - \varphi_{1min}}{n};$$

$$\varphi_{3_j} = [\varphi_{3min}, \varphi_{3max}] \left\{ \varphi_{3_j} \parallel R: \varphi_{3min} \leq \varphi_{3_j} \leq \varphi_{3max} \right\}, \quad (10)$$

$$\Delta \varphi_{3_j} = \frac{\varphi_{3max} - \varphi_{3min}}{m};$$

$$\varphi_{4_z} = [\varphi_{4min}, \varphi_{4max}] \left\{ \varphi_{4_z} \parallel R: \varphi_{4min} \leq \varphi_{4_z} \leq \varphi_{4max} \right\}, \quad (11)$$

$$\Delta \varphi_{4_z} = \frac{\varphi_{4max} - \varphi_{4min}}{l};$$

$$\Phi(\Delta \varphi_{1_i}, \Delta \varphi_{3_j}, \Delta L_{T.чс_k}, \Delta L_{T.р_g}, P_{01ij}, \lambda_l) = h(\Delta \varphi_{1_i}, \Delta \varphi_{3_j}, \Delta L_{T.чс_k}, \Delta L_{T.р_g}, P_{01ij}) + \lambda_l[\omega_l] \rightarrow \max \quad (14)$$

де $\lambda_l[\omega_l]$ – множник Лагранжа по кожному аргументу, який дорівнює:

$$\lambda_l[\omega_l] = \lambda_l \left[M_{УТ} - M_{ПЕР, m} \left(\begin{matrix} \Delta \varphi_{1_i}, \Delta \varphi_{3_j}, \Delta L_{T.чс_k}, \\ \Delta L_{T.р_g}, P_{01ij} \end{matrix} \right) \right], \quad (15)$$

де $M_{УТ}$ та $M_{ПЕР}$ – відповідно утримувальний та перекидний моменти, таким чином умова стійкості виконується автоматично.

Цикл розрахунку повторюватиметься на кожній ділянці m руху точки M – різальної кромки ковша. Початковими координатами для кожної наступної траєкторії будуть координати в кожній точці попередньої траєкторії. Система відкрита, тому можна додавати додаткові чи прибирати введені обмеження для оптимізації по конкретному параметру. В даному випадку розглядається активна зміна усіх аргументів для розрахунку товщини стружки.

Визначаємо дотичне зусилля $P_{01}^{\Gamma\Pi}$ на різальній кромці ковша (по зусиллю гідроциліндра) під час копання поворотом рукояті (рис. 7):

$$P_{01}^{\Gamma\Pi} = R_{T.P+K}^{-1} \left[\frac{P_H \pi D^2 \rho l (\varphi_{Поч} + \Delta \varphi_3)}{4S} + G_{T.P} r_{G_{T.P}} + (G_K + S_{ij} b_K \gamma_T) \right] \quad (16)$$

де $G_{Hчс}$, $G_{Tчс}$, $G_{T.р}$, G_K – сили тяжіння разом із відповідними гідроциліндрами елементів ТРО та ковша; $r_{G_{Hчс}}$, $r_{G_{Tчс}}$, $r_{G_{T.р}}$, $r_{G_{K+г}}$ – плечі

$$L_{T.чс_k} = [L_{T.чсmin}, L_{T.чсmax}] \left\{ \begin{matrix} L_{T.чс_k} \parallel R: \\ L_{T.чсmin} \leq L_{T.чс_k} \leq L_{T.чсmax} \end{matrix} \right\}, \quad (12)$$

$$\Delta L_{T.чс_k} = \frac{L_{T.чсmax} - L_{T.чсmin}}{u};$$

$$L_{T.р_g} = [L_{T.рmin}, L_{T.рmax}] \left\{ \begin{matrix} L_{T.р_g} \parallel R: \\ L_{T.рmin} \leq L_{T.р_g} \leq L_{T.рmax} \end{matrix} \right\}, \quad (13)$$

$$\Delta L_{T.р_g} = \frac{L_{T.рmax} - L_{T.рmin}}{w},$$

де $i, j, z, n, m, l, k, g, u, w$ – умовні одиниці.

Застосуємо метод невизначених множників Лагранжа для створення цільової функції $h_{max} = f(\varphi_1, \varphi_3, L_{T.чс}, L_{T.р}, P_{01}, K_{СТ})$ та знаходження умовних локальних екстремумів на кожному із цих відрізків, за відповідних значень у цих положеннях дотичної складової опору ґрунту копанню P_{01} та забезпечення коефіцієнта стійкості $K_{СТ}$. Функція Лагранжа матиме вигляд:

відповідних сил визначаються за формулами (17) – (23); S_{ij} – площа повздовжнього перетину елемента вирізаної стружки.

$$r_{G_{Hчс}} = (L_{Hчс} \cdot l_{G_{Hчс}}) \cos \varphi_1; \quad (17)$$

$$r_{G_{Tчс}} = L_{Hчс} \cos \varphi_1 + (L_{Tчс} \cdot l_{G_{Tчс}}) \cos \Delta_1; \quad (18)$$

$$\Delta_1 = (\varphi_1 - (\pi - \varphi_2)); \quad (19)$$

$$r_{G_{T.р}} = L_{Hчс} \cos \varphi_1 + L_{Tчс} \cos \Delta_1 + \dot{\iota} + (L_{T.р} \cdot l_{G_{T.р}}) \cos \Delta_2; \quad (20)$$

$$\Delta_2 = (\Delta_1 - (\pi - \varphi_3)); \quad (21)$$

$$r_{G_{K+г}} = L_{Hчс} \cos \varphi_1 + L_{Tчс} \cos \Delta_1 + \dot{\iota} + L_{Tр} \cos \Delta_2 + (R_K \cdot l_{G_{K+г}}) \cos \Delta_3; \quad (22)$$

$$\Delta_3 = (\Delta_2 - (\pi - \varphi_4)); \quad (23)$$

де $l_{G_{Hчс}}$, $l_{G_{Tчс}}$, $l_{G_{T.р}}$, $l_{G_{K+г}}$ – відповідно відсоткові коефіцієнти положення центра ваги від довжини нижньої частини стріли, телескопічної частини стріли, телескопічної рукояті та ковша із ґрунтом [9; 10].

Повздовжній перетин вирізаної ґрунтової стружки обмежується кривими: $Y1$ – від точки M до M_{ij} ; $Y2$ – від точки M_{ij} до M'_{ij} ; $Y3$ – від точки M'_{ij} до M ; $Y4$ – від точки M до M , тоді рівняння цих кривих відповідно дорівнюють:

$$Y1(x) = \dot{\iota} \sqrt{(L_{T.рg} + r_K)^2 - (x - x_{Bij})^2} + \dot{\iota} \quad (24)$$

$$+y_{B_{ij}};$$

$$Y_2(x) = \sqrt{r_K^2 - (x - x_{C_{(z+1)ij}})^2} + \dot{z} \quad (25)$$

$$+y_{C_{(z+1)ij}};$$

$$Y_3(x) = \dot{z} \sqrt{(L_{T.P.g} + r_K)^2 - (x - x_{B_{(z-1)ij}})^2} +$$

$$+y_{B_{(z-1)ij}};$$

$$Y_4(x) = \sqrt{r_K^2 - (x - x_{C_{zij}})^2} + y_{C_{zij}}. \quad (27)$$

При подальшому копанні ($y_{B_{ij}} > h_{ш}$) утворюється крива Y_5 , яка відповідає крайнім положенням елементів ТРО, радіусом $R_{T.C+T.P+K}$:

$$S_{ij} = \iint_D dx dy = \int_{x_{M_i}}^{x_M} dx \int_{Y_1(x)}^{Y_4(x)} dy + \dot{z}$$

$$+ \int_{x_{M_i}}^{x_{M_j}} dx \int_{Y_3(x)}^{Y_2(x)} dy + \dot{z} \quad (29)$$

за $y_{B_{ij}} > h_{ш}$

$$S'_{ij} = \iint_D dx dy = \int_{x_{M_i}}^{x_M} dx \int_{Y_1(x)}^{Y_5(x)} dy + \dot{z}$$

$$+ \int_{x_{M_i}}^{x_{M_j}} dx \int_{Y_2(x)}^{Y_3(x)} dy + \dot{z} \quad (30)$$

Дотична складова зусилля опору ґрунту копанню P_{01}^{IP} з умови постійності питомого опору ґрунту копанню в процесі копання $K_{ПТ} = const$, яка забезпечується зміною товщини вирізаної стружки за умови $P_{01}^{IP} \leq P_{01}^{ГП}$. Тоді, відповідно до формул (1) і (6):

$$\frac{P_{01}^{IP}}{bK_{ПТ}} = \sqrt{(Y_{M_1} - Y_M)^2 + (X_{M_1} - X_M)^2}. \quad (31)$$

Момент утримувальний відносно точки $W(X_W, Y_W)$ (рис. 7):

$$M_{УТ} = G_{ПВ} \cdot (r_{G_{ПВ}} + r_W). \quad (32)$$

Момент перекиданий відносно точки $W(X_W, Y_W)$ (рис. 7):

$$Y_5(x) = \sqrt{R_{T.C+T.P+K}^2 - (x - x_{M_i})^2}. \quad (28)$$

Таким чином, площа повздовжнього перетину вирізаної ґрунтової стружки S_{ij} з урахуванням коефіцієнтів розпушення ґрунту k_P та наповнення ковша k_H , дорівнюватиме:

$$\text{за } (y_{B_{ij}} \leq h_{ш})$$

$$M_{ПЕР} = f \left(\begin{matrix} \Delta\varphi_1, \Delta\varphi_3, \\ \Delta L_{T.ЧC_k}, \Delta L_{T.P_g}, P_{01ij} \end{matrix} \right) = \dot{z}$$

$$\dot{z} G_{HЧC} (r_{G_{HЧC}} - r_W) + G_{ТЧC} (r_{G_{ТЧC}} - r_W)$$

$$+ G_{Т.P} (r_{G_{Т.P}} - r_W)$$

$$+ (G_K + S_{ij} b_K \gamma_I) (r_{G_{K+I}} - r_W) + \dot{z} \quad (33)$$

$$+ P_{01} \cos \theta (X_M - r_W);$$

$$\theta = \frac{\pi}{2} - (\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 + \varphi_4) \quad (34)$$

На рисунку 2 наведено графік залежності коефіцієнта стійкості $K_{СТ}$ від зміни кута повороту телескопічної рукояті φ_3 та місткості ковша q_i під час копання на максимальному вильоті

телескопічних стріли та рукояті та ковшем місткістю $q_i = 0.8 \text{ м}^3$, а також графіки залежності коефіцієнта стійкості K_{CT} та дотичної складової зусилля копання P_{01} від зміни кута повороту телескопічної рукояті φ_{3j} (рис. 3).

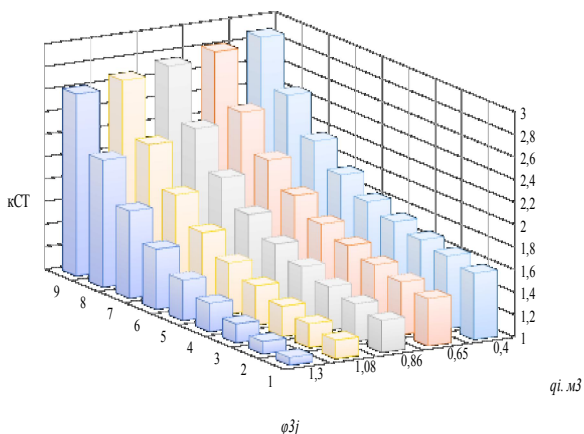


Рис. 2. Графік залежності коефіцієнта стійкості K_{CT} від зміни кута повороту телескопічної рукояті φ_{3j} та місткості ковша q_i / Fig. 2. A graph of the coefficient of resistance of K_{CT} change the rotation angle of the telescopic handle φ_{3j} and the capacity of the bucket q_i

Будуємо функцію Лагранжа в загальному вигляді для усіх обмежень по товщині стружки, з умови забезпечення стійкості та максимального зусилля P_{01} на різальній кромці ковша, використовуючи невизначені множники :

$$\lambda_1 [M_{yT} - f(\Delta\varphi_{1j})] = 0; \quad (35)$$

$$\lambda_2 [M_{yT} - f(\Delta\varphi_{3j})] = 0; \quad (36)$$

$$\lambda_3 [M_{yT} - f(\Delta L_{T.чC_k})] = 0; \quad (37)$$

$$\lambda_4 [M_{yT} - f(\Delta L_{T.P_g})] = 0; \quad (38)$$

$$\lambda_5 [M_{yT} - f(P_{01ij})] = 0. \quad (39)$$

$$\Phi \left(\begin{matrix} \Delta\varphi_{1j}, \Delta\varphi_{3j}, \Delta L_{T.чC_k}, \Delta L_{T.P_g}, P_{01ij} \\ \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4, \lambda_5 \end{matrix} \right) = \sum_{i=1}^5 h \left(\begin{matrix} \Delta\varphi_{1j}, \Delta\varphi_{3j}, \\ \Delta L_{T.чC_k}, \Delta L_{T.P_g}, P_{01ij} \end{matrix} \right) \quad (40)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \Phi}{\partial \Delta\varphi_{1j}} &= 0, \\ \frac{\partial \Phi}{\partial \Delta\varphi_{3j}} &= 0, \\ \frac{\partial \Phi}{\partial \Delta L_{T.чC_k}} &= 0, \\ \frac{\partial \Phi}{\partial \Delta L_{T.P_g}} &= 0, \\ \frac{\partial \Phi}{\partial P_{01ij}} &= 0, \\ \frac{\partial \Phi}{\partial \lambda_1} &= 0, \\ &\dots \\ \frac{\partial \Phi}{\partial \lambda_5} &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (41)$$

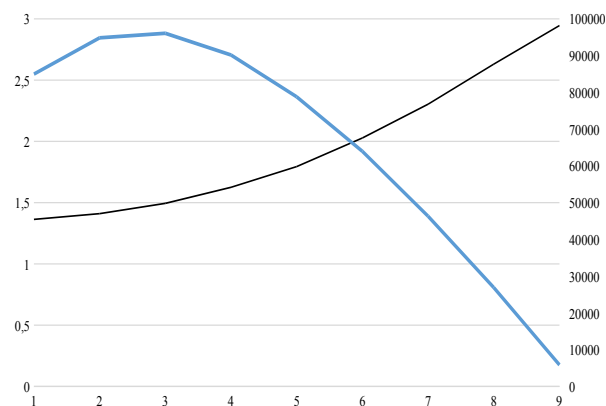


Рис. 3. Графіки залежності коефіцієнта стійкості K_{CT} та дотичної складової зусилля копання P_{01} від зміни кута повороту телескопічної рукояті φ_{3j} / Fig. 3. Graphs of the dependence of the coefficient of resistance K_{CT} and the tangent component of the digging forces P_{01} from the change of the rotation angle of the telescopic handle φ_{3j}

Будуємо функції Лагранжа для визначення товщини ґрунтової стружки в окремих випадках (рис. 4–6), з умов забезпечення стійкості та максимального зусилля P_{01} на різальній кромці ковша, використовуючи невизначені множники (35) – (39):

– під час копання поворотом рукояті на кут $\Delta\varphi_{3j}$ з адаптацією кута $\Delta\varphi_{1j}$ та постійних розмірах телескопічної частини стріли та рукояті (рис. 4):

$$\Phi(\Delta\varphi_{1j}, \Delta\varphi_{3j}, P_{01ij}, \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) = \sum_{i=1}^3 [h(\Delta\varphi_{1j}, \Delta\varphi_{3j}, P_{01ij}) + \lambda_i \omega_i] \quad (42)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \Phi}{\partial \Delta \varphi_1} = 0, \\ \frac{\partial \Phi}{\partial \Delta \varphi_3} = 0, \\ \frac{\partial \Phi}{\partial P_{01ij}} = 0, \\ \frac{\partial \Phi}{\partial \lambda_1} = 0, \\ \dots \\ \frac{\partial \Phi}{\partial \lambda_3} = 0; \end{array} \right. \quad (43)$$

– під час копання поворотом рукояті на кут $\Delta \varphi_3$ з адаптацією по довжині телескопічної частини стріли $\Delta L_{T.чC_k}$ та постійних розмірах телескопічної рукояті та кута $\Delta \varphi_1$ (рис. 5):

$$\Phi(\Delta \varphi_3, \Delta L_{T.чC_k}, P_{01ij}, \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) = \sum_{i=1}^3 [h(\Delta \varphi_3, \Delta L_{T.чC_k}, P_{01ij}) + \lambda_i \omega_i] \rightarrow (44)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \Phi}{\partial \Delta \varphi_3} = 0, \\ \frac{\partial \Phi}{\partial \Delta L_{T.чC_k}} = 0, \\ \frac{\partial \Phi}{\partial P_{01ij}} = 0, \\ \frac{\partial \Phi}{\partial \lambda_1} = 0, \\ \dots \\ \frac{\partial \Phi}{\partial \lambda_3} = 0; \end{array} \right. \quad (45)$$

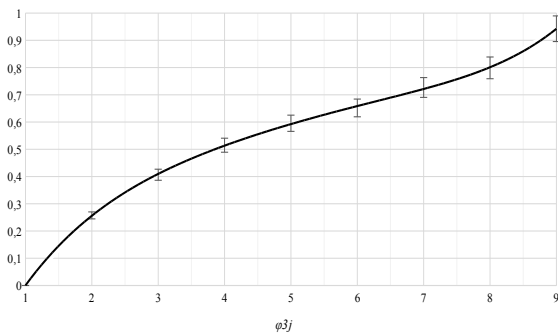


Рис. 4. Оптимізаційний графік зміни ординати точки В – шарніра кріплення рукояті від зміни кута повороту телескопічної рукояті φ_3 / Fig. 4. Optimization graph of the ordinate of the point В – hinge attaching the handle from the change of the rotation angle of the telescopic handle φ_3

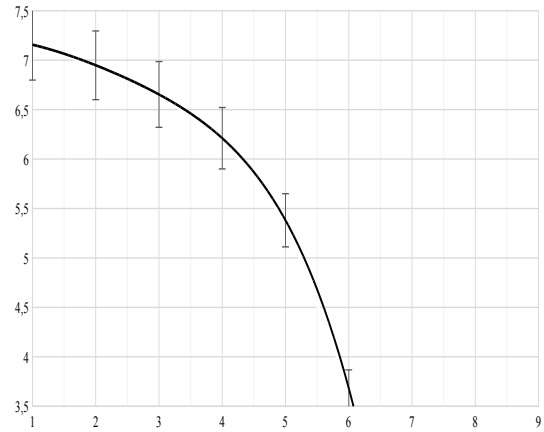


Рис. 5. Оптимізаційний графік зміни довжини телескопічної частини стріли $L_{T.чC}$ від зміни кута повороту телескопічної рукояті φ_3 / Fig. 5. Optimization graph of the changes in telescopic length of the boom $L_{T.чC}$ the world cup changes the rotation angle of the telescopic handle φ_3 ,

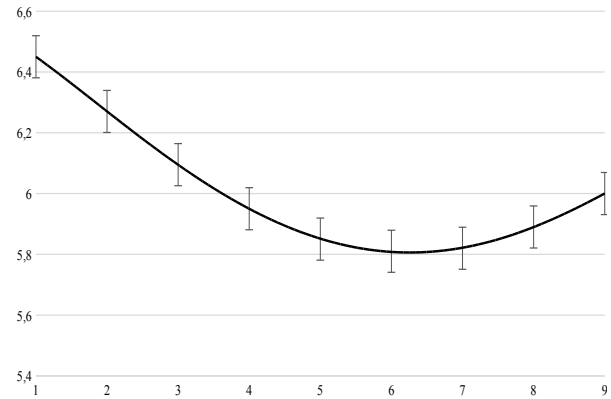


Рис. 6. Оптимізаційний графік зміни довжини телескопічної рукояті $L_{T.P}$ від зміни кута повороту телескопічної рукояті φ_3 / Fig. 6. Optimization graph of change of length of the telescopic handle $L_{T.P}$ changes the rotation angle of the telescopic handle φ_3

– під час копання поворотом рукояті на кут $\Delta \varphi_3$ з адаптацією по довжині телескопічної рукояті $\Delta L_{T.P_g}$ та постійних розмірах телескопічної стріли та кута $\Delta \varphi_1$ (рис. 6):

$$\Phi(\Delta \varphi_3, \Delta L_{T.P_g}, P_{01ij}, \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) = \sum_{i=1}^3 [h(\Delta \varphi_3, \Delta L_{T.P_g}, P_{01ij}) + \lambda_i \omega_i] \cdot (46)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \Phi}{\partial \Delta \varphi_3} = 0, \\ \frac{\partial \Phi}{\partial \Delta L_{T.P_g}} = 0, \\ \frac{\partial \Phi}{\partial P_{01ij}} = 0, \\ \frac{\partial \Phi}{\partial \lambda_1} = 0, \\ \dots \\ \frac{\partial \Phi}{\partial \lambda_3} = 0. \end{array} \right. \quad (47)$$

Будуємо обмежувальну траєкторію копання через точки екстремумів кожній ділянці m руху точки M (рис. 7).

Копання відбувається по градієнтній кривій на кожній ділянці m руху точки M через точки екстремуму з умов наповнення ковша.

Для оцінки ефективності та експлуатаційних властивостей ОГЕ, обладнаних ТРО та комплексів запропоновано низку показників різноманітного призначення, які формалізують особливості прийняття технічного рішення в різних проектних ситуаціях (табл. 1).

Упровадження ТРО сприяє розширенню технологічних умов виконання робіт, таким чином, ОГЕ однієї розмірної категорії може виконувати роботи на глибинах ОГЕ декількох розмірних груп, у тому числі наступної розмірної категорії, тим самим РО. Для визначення ефективності використання ОГЕ з ТРО по глибині та радіусу копання розроблено низку показників:

– показник оцінки енергоємності по глибині копання:

$$H_N = \frac{N}{H_K} = \frac{N}{\sum_{1,1}^{n,Q} H_K^T p_i}, H_N \rightarrow \min; \quad (48)$$

– показник оцінки матеріалоємності по глибині копання:

$$H_G = \frac{G}{H_K} = \frac{G}{\sum_{1,1}^{n,Q} H_K^T p_i}, H_G \rightarrow \min; \quad (49)$$

– узагальнений показник економії енергоємності та матеріалоємності по глибині копання:

$$H_{NG} = \frac{NG}{H_K^2} = \frac{NG}{\left(\sum_{1,1}^{n,Q} H_K^T p_i \right)^2}, \quad (50)$$

$$H_{NG} \rightarrow \min;$$

– показник оцінки енергоємності по радіусу копання :

$$R_N = \frac{N}{R} = \left[\min \left(\frac{N}{R^T} \right), \max \left(\frac{N}{R^T} \right) \right], \quad (51)$$

$R_N \rightarrow \min;$

– показник оцінки матеріалоємності по радіусу копання :

$$R_G = \frac{G}{R} = \left[\min \left(\frac{G}{R^T} \right), \max \left(\frac{G}{R^T} \right) \right], \quad (52)$$

$R_G \rightarrow \min;$

– узагальнений показник економії енергоємності та матеріалоємності по радіусу копання:

$$R_{NG} = \frac{NG}{R^2} = \left[\min \left(\frac{NG}{(R^T)^2} \right), \max \left(\frac{NG}{(R^T)^2} \right) \right], \quad (53)$$

$R_{NG} \rightarrow \min;$

Виконання спеціальних робіт (наприклад, копання глибоких траншей) не завжди потребує використання ковшів великої місткості для цих робіт. Таким чином, створюючи ТРО, треба враховувати технологічні умови використання робочих органів. Тому систему показників оцінки ефективності ТРО ОГЕ доповнено визначенням значень додаткових показників, в основі яких лежить урахування типорозміру ковша по його місткості q, M^3 [7]:

– показник оцінки енергоємності по місткості ковша q_N :

$$q_N = \frac{N}{q}, q_N \rightarrow \min; \quad (54)$$

– показник оцінки матеріалоємності по місткості ковша q_G :

$$q_G = \frac{G}{q}, q_G \rightarrow \min; \quad (55)$$

– узагальнений показник економії енергоємності та матеріалоємності по місткості ковша, q_{NG} :

$$q_{NG} = \frac{NG}{q^2}, q_{NG} \rightarrow \min; \quad (56)$$

– узагальнений показник економії енергоємності та матеріалоємності по глибині копання та місткості ковша, H_{NGq} :

$$H_{NGq} = \frac{N^2 G^2}{H_K^2 q^2} = \frac{N^2 G^2}{\left(\sum_{1,1}^{n,Q} H_K^T p_i \right)^2 q^2}, \quad (57)$$

$H_{NGq} \rightarrow \min;$

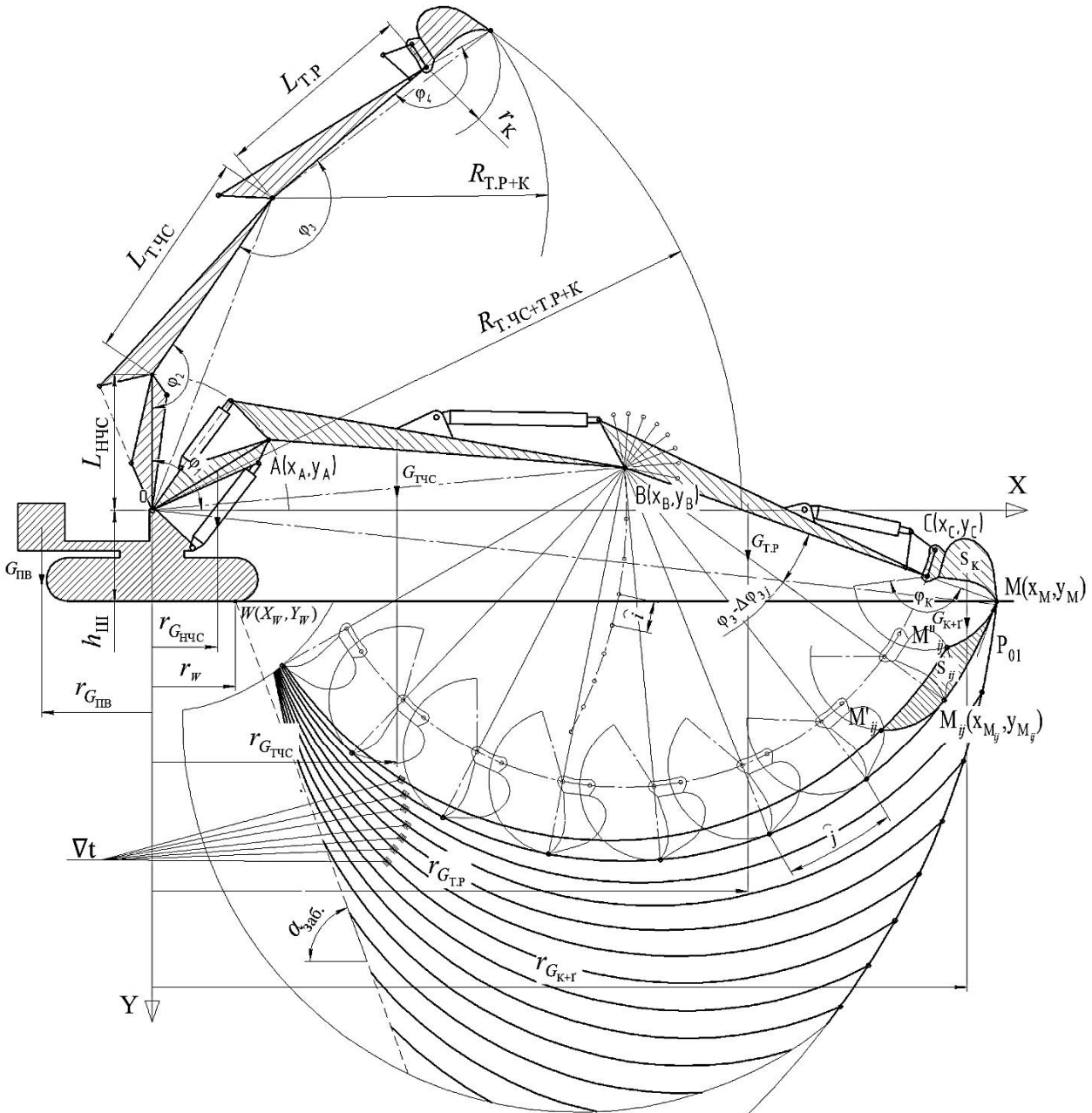


Рис. 7. Розрахункова схема для визначення траєкторій копання та товщини ґрунтової стружки: ∇t – градієнтні траєкторії; $\alpha_{заб.}$ – кут забою, визначається відповідно до категорії ґрунту / Fig. 7. Calculation scheme to determine the course of the digging and soil thickness chip: ∇t – the gradient of the trajectory; $\alpha_{заб.}$ – the angle of the slaughter, determined in accordance with the category of soil

– узагальнений показник економії енергоємності та матеріалоемності по радіусу копання та місткості ковша, R_{NGq} :

$$R_{NGq} = \frac{N^2 G^2}{R^2 q^2} = \dot{i} \left[\min \left(\frac{N^2 G^2}{(R^T)^2 q^2} \right), \max \left(\frac{N^2 G^2}{(R^T)^2 q^2} \right) \right], \quad (58)$$

$$R_{NGq} \rightarrow \min.$$

Забезпечення різноманіття геометричних параметрів РО ОґЕ у традиційних структурах РО вимагає використання змінних чи додаткових елементів РО, що, у свою чергу, потребує залучення додаткового персоналу для виконання цих робіт. Застосування ТРО дозволяє мінімізувати час простою та виключити залучення додаткового персоналу:

– виробіток на одного працівника, де w – кількість робітників, залучених для виконання i -ї операції:

$$w_{\text{III}} = \frac{1}{w} \cdot \sum_{1,1}^{n,Q} \Pi_{e_i}, w_{\text{III}} \rightarrow \max \quad (59).$$

Перевірочні розрахунки за наведеною системою показників проводились для універсального ОґЕ, IV розмірної групи, оснащеного трисекційними телескопічними механізмами стріли і рукояті. За машину-прототип було взято ОґЕ фірми Hitachi – ZX 290LC, при цьому ТРО поєднує в собі параметри ОґЕ оснащеного як традиційним РО, так і РО зі збільшеними геометричними параметрами. Під час проведення розрахунків розглядалися технологічні схеми ТРО за різних варіацій уштовхування – втягування телескопічних секцій стріли та рукояті,

загалом дев'ятьох варіантів, які охоплюють усі можливі глибини та радіуси копання для ОґЕ III та IV розмірних категорій.

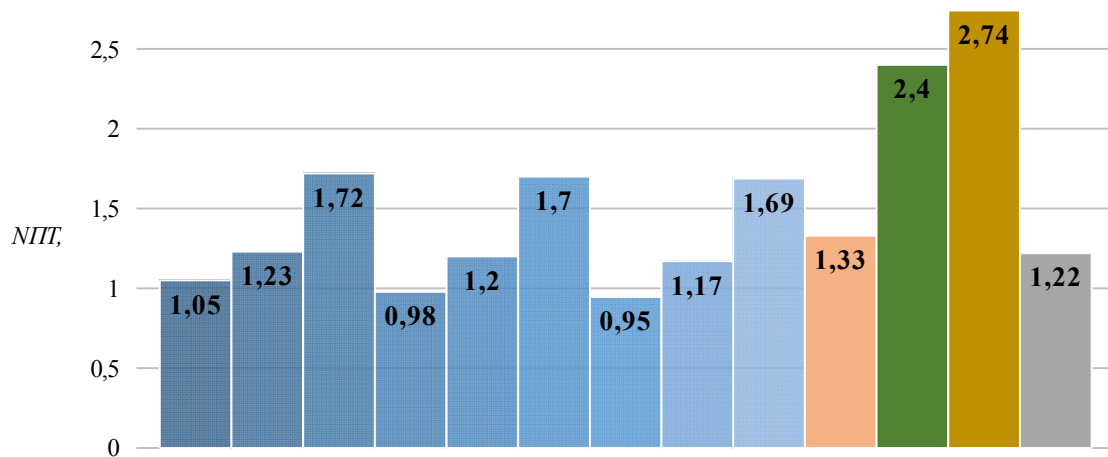
Результати перевірочних розрахунків наведені у вигляді гістограм за основними показниками з порівнянням відомих моделей ОґЕ таких фірм як Hitachi ZX250LC-6 із традиційним РО, New Holland E215DLC-ME з трьома рукоятями, E265BJ-LC з РО збільшеної довжини, Komatsu PC240LC-10 з традиційним РО (рис. 8–10).

Таблиця

Система показників для оцінки ефективності телескопічного робочого обладнання / The system of indicators to assess the effectiveness of telescopic working equipment

№ п/п	Показники	Розмірність	Загальна форма запису показників	Умови раціоналізації та оптимізації
1	2	3	4	5
1	Експлуатаційна продуктивність на <i>i</i> -му виді робіт	$\frac{M^3}{год}$	P_e	$P_e \rightarrow max$
2	Об'єм ґрунту, розроблюваного в періоді одного переміщення ОґЕ	M^3	$V_{mex.i}$	$V_{mex.i} \rightarrow max$
3	Глибина копання	м	H_K	$H_K \rightarrow max$
4	Радіус копання	м	R	$R \rightarrow max$
5	Місткість ковша	M^3	q	$q \rightarrow max$
6	Маса (сила тяжіння) ОґЕ	кґ (кН)	G	$G \rightarrow min$
7	Потужність ОґЕ	кВт	N	$N \rightarrow min$
8	Час циклу та переміщення	с	$t_u, t_{nep.}$	$t_u \rightarrow min$ $t_{nep.} \rightarrow min$
9	Питома енергоємність	$\frac{кВт}{\frac{M^3}{год}}$	$N_{IT} = \frac{N}{P_e}$	$N_{IT} \rightarrow min$
10	Питома матеріалоємність	$\frac{кН}{\frac{M^3}{год}}$	$G_{IT} = \frac{G}{P_e}$	$G_{IT} \rightarrow min$
11	Узагальнений показник енергоємності та матеріалоємності	$\frac{кВт \cdot кН}{(\frac{M^3}{год})^2}$	$P_{NG} = \frac{NG}{P_e^2}$	$P_{NG} \rightarrow min$
12	Показник оцінки енергоємності по глибині копання	$\frac{кВт}{м}$	$H_N = \frac{N}{H_K}$	$H_N \rightarrow min$
13	Показник оцінки матеріалоємності по глибині копання	$\frac{кН}{м}$	$H_G = \frac{G}{H_K}$	$H_G \rightarrow min$
14	Узагальнений показник економії енергоємності та матеріалоємності по глибині копання	$\frac{кВт \cdot кН}{M^2}$	$H_{NG} = \frac{NG}{H_K^2}$	$H_{NG} \rightarrow min$
15	Показник оцінки енергоємності по радіусу копання	$\frac{кВт}{м}$	$R_N = \frac{N}{R}$	$R_N \rightarrow min$
16	Показник оцінки матеріалоємності по радіусу копання	$\frac{кН}{м}$	$R_G = \frac{G}{R}$	$R_G \rightarrow min$

Закінчення таблиці				
1	2	3	4	5
17	Узагальнений показник економії енергоємності та матеріалоємності по радіусу копання	$\frac{\kappa Bm \cdot \kappa H}{M^2}$	$R_{NG} = \frac{NG}{R^2}$	$R_{NG} \rightarrow \min$
18	Питома продуктивність по потужності ОГЕ	$\frac{\left(\frac{M^3}{год}\right)}{\kappa Bm}$	$\Pi_{\Pi T_N} = \frac{\Pi_{e_i}}{N}$	$\Pi_{\Pi T_N} \rightarrow \max$
19	Питома продуктивність по масі ОГЕ	$\frac{\left(\frac{M^3}{год}\right)}{\kappa H}$	$\Pi_{\Pi T_G} = \frac{\Pi_{e_i}}{G}$	$\Pi_{\Pi T_G} \rightarrow \max$
20	Показник оцінки енергоємності по місткості ковша	$\frac{\kappa Bm}{M^3}$	$q_N = \frac{N}{q}$	$q_N \rightarrow \min$
21	Показник оцінки матеріалоємності по місткості ковша	$\frac{\kappa H}{M^3}$	$q_G = \frac{G}{q}$	$q_G \rightarrow \min$
22	Узагальнений показник економії енергоємності та матеріалоємності по місткості ковша	$\frac{\kappa Bm \cdot \kappa H}{M^6}$	$q_{NG} = \frac{NG}{q^2}$	$q_{NG} \rightarrow \min$
23	Узагальнений показник економії енергоємності та матеріалоємності по глибині копання та місткості ковша	$\frac{\kappa Bm^2 \cdot \kappa H}{M^8}$	$H_{NGq} = \frac{N^2 G^2}{H_K^2 q^2}$	$H_{NGq} \rightarrow \min$
24	Узагальнений показник економії енергоємності та матеріалоємності по радіусу копання та місткості ковша	$\frac{\kappa Bm^2 \cdot \kappa H}{M^8}$	$R_{NGq} = \frac{N^2 G^2}{R^2 q^2}$	$R_{NGq} \rightarrow \min$
25	Виріботок на одного робітника	$\frac{\left(\frac{M^3}{год}\right)}{w}$	$w_{\Pi T} = \frac{\Pi_{e_i}}{w}$	$w_{\Pi T} \rightarrow \max$
26	Узагальнений показник енергоємності, матеріалоємності та виробітку на одного робітника	$\frac{\kappa Bm \cdot \kappa H \cdot \left(\frac{M^3}{год}\right)}{\left(\frac{M^3}{год}\right)^3}$	$\Pi_{NGw} = \frac{NGw}{\Pi_{e_i}^3}$	$\Pi_{NGw} \rightarrow \min$



a

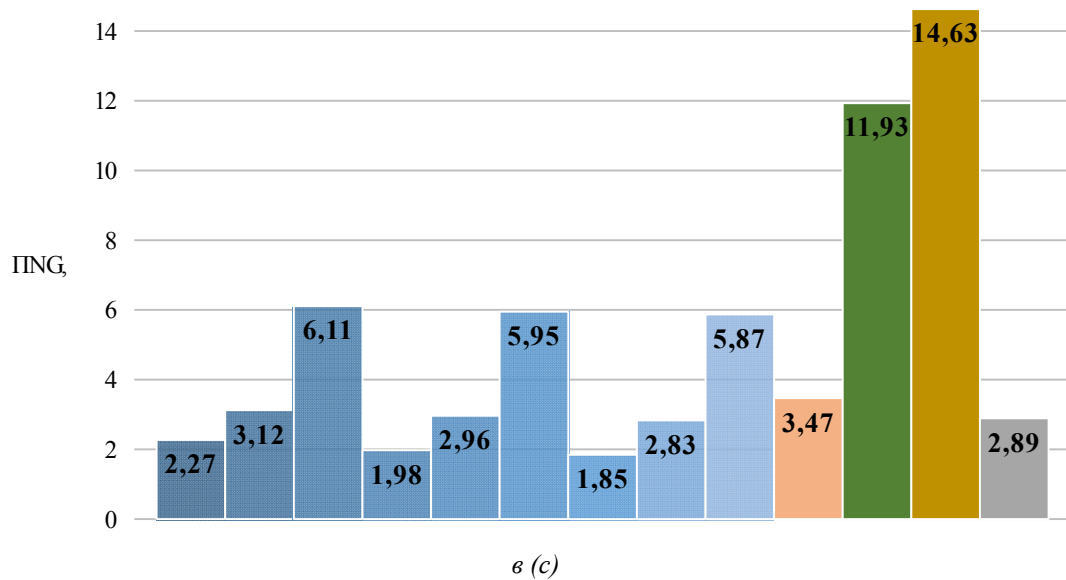
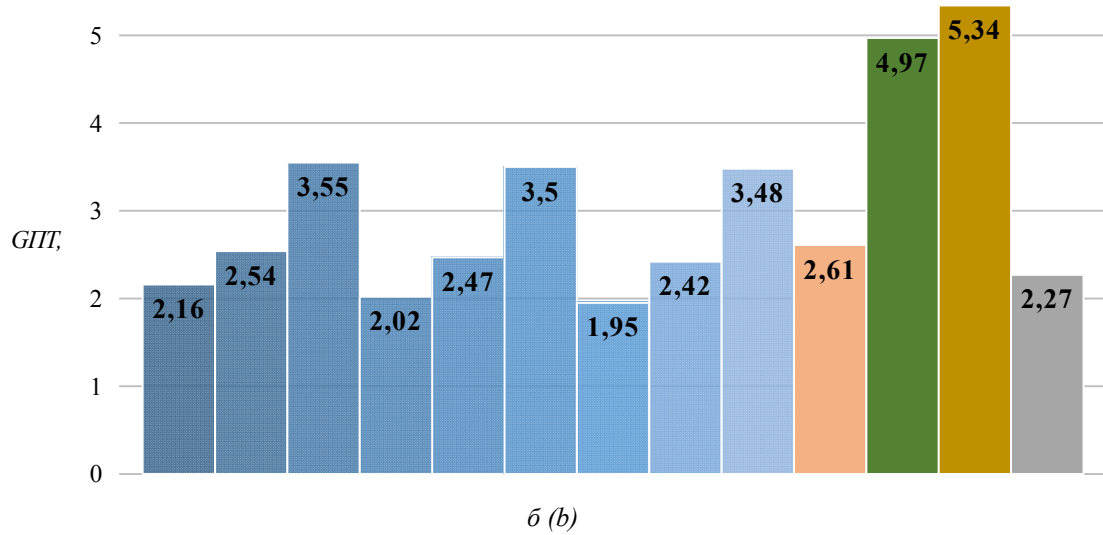
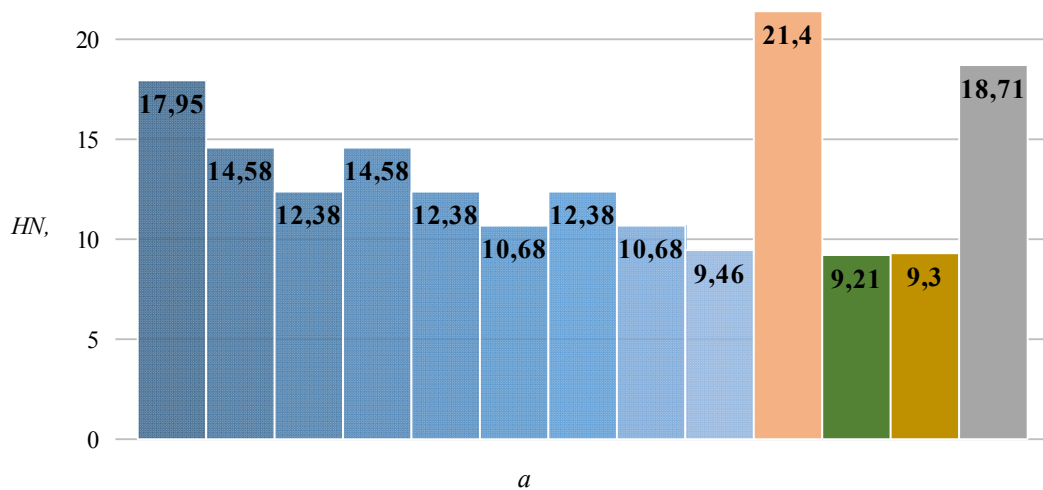


Рис. 8. Гістограми порівняльної оцінки ефективності ТРО ОГЕ: а – за питомою енергоємністю; б – за питомою матеріалоемністю; в – за узагальненим показником енергоємності та матеріалоемності / Fig. 8. Histogram comparative evaluation of the effectiveness of TRO OGE : a – in specific power consumption; b – specific material; c – the generalized indicator of energy and material demand



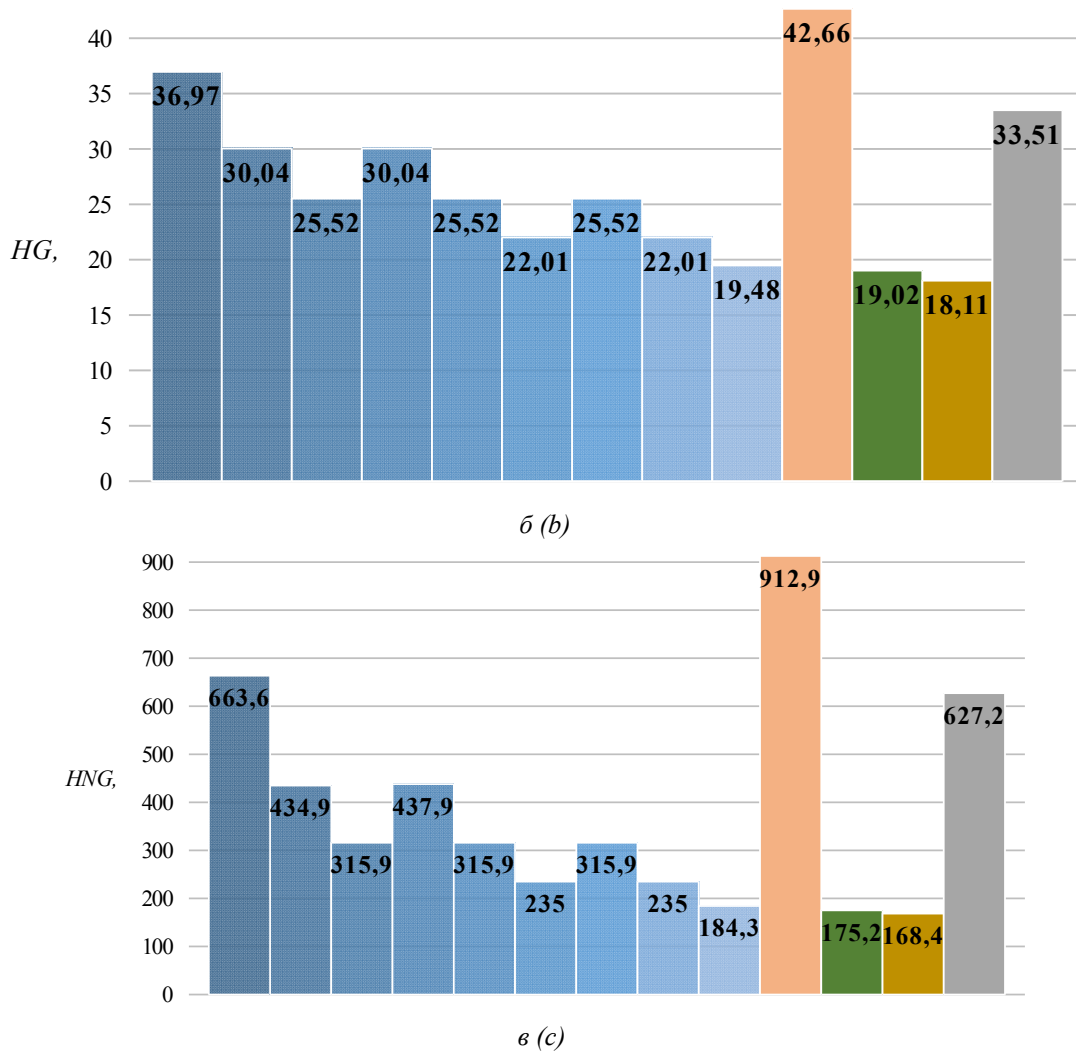


Рис. 9. Гістограми порівняльної оцінки ефективності ТРО ОГЕ: а – показника енергоємності по глибині копання; б – показника матеріалоємності по глибині копання; в – узагальненого показника енергоємності та матеріалоємності по глибині копання / Fig. 9. Histogram comparative evaluation of the effectiveness of TRO OGE : a – energy intensity index of the depth of digging; b – indicator of material consumption the digging depth; c – a composite index of energy and material demand according to the depth of digging

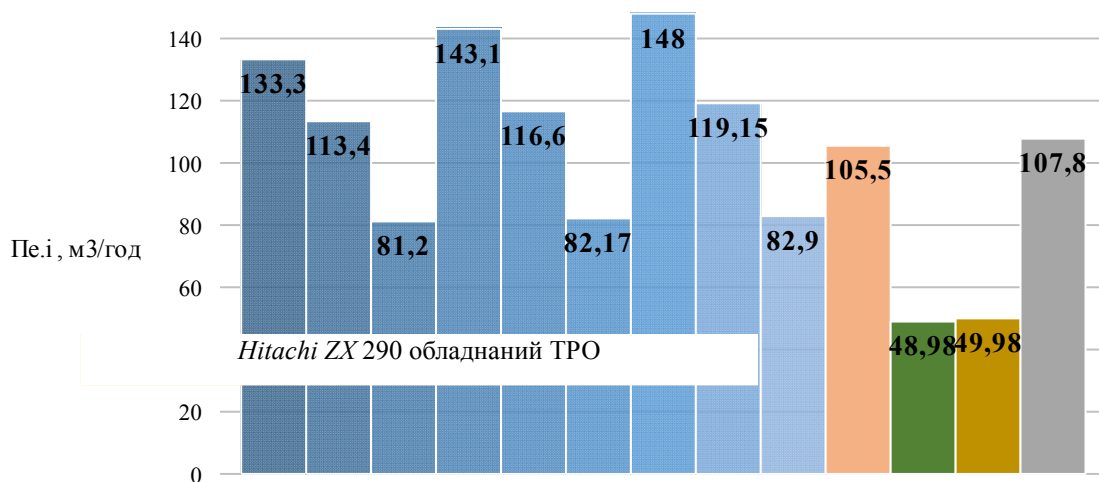


Рис. 10. Гістограми порівняльної оцінки ефективності ТРО ОГЕ по продуктивності / Fig. 10. Histogram comparative evaluation of the effectiveness of TRO OGE performance

Висновки

1. Наведені оптимізаційні математичні моделі (40) – (47) для визначення максимально можливої товщини вирізанної стружки під час копання ТРО ОГЕ дозволили досягти моделювання заданої категорії ґрунту підтриманням постійного значення питомого опору копанню ґрунту через регулювання товщини ґрунтової стружки для забезпечення стійкості та максимально допустимого зусилля копання.

2. Наведені оптимізаційні графіки для руху по градієнтній траєкторії з розрахунковою товщиною ґрунтової стружки для зміни ординати шарніра кріплення рукояті, зміни довжини телескопічної частини стріли та зміни довжини телескопічної рукояті від зміни кута повороту телескопічної рукояті показують коректність моделей:

– для зміни кута РО гідроциліндрами стріли та зміни довжини телескопічної рукояті;

– для зміни довжини телескопічної частини стріли адаптація можлива до шостого розрахункового положення, для наступних розрахункових положень рішення знаходиться поза

межами геометричних параметрів ТРО, таким чином, зміну довжини телескопічної частини стріли необхідно поєднувати з одночасною зміною довжини телескопічної рукояті чи кута РО гідроциліндрами стріли.

3. Упровадження і використання наведених математичних моделей дозволить зменшити енергоємність процесу копання та підвищити продуктивність ОГЕ.

4. Оцінка ефективності за запропонованою системою показників показала, що найкраще рішення щодо умов раціоналізації та оптимізації знаходиться в межах застосування ТРО. Окрім цього, застосування телескопічних механізмів для телескопування стріли дозволяє підвищити продуктивність порівняно з традиційним РО на 28...40 %.

5. Використання ТРО дозволяє значно розширити функціональні можливості за рахунок збільшення геометричних параметрів, а також розширити діапазон робіт, що виконуються.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Интенсификация разработки грунтов в дорожном строительстве : монография [В. И. Баловнев, Л. А. Хмара]. – Москва: Транспорт, 1993. – 383с.
2. Земляные работы : монография [Ю. И. Беляков, А. Л. Левинзон, В. А. Галимуллин]. – Москва : Стройиздат, 1990. – 281 с.
3. Гаркави Н. Г. Машины для земляных работ : монография / Н. Г. Гаркави. – Москва : Высшая школа, 1982. – 335 с.
4. Одноковшовые гидравлические экскаваторы : метод. указ. к выполнению курсового проекта к дисциплине «Машины для земляных работ» для студентов механических специальностей [В. К. Тимошенко, Л. А. Хмара, М. И. Деревянчук, И. А. Кулик]. – Днепропетровск : ДИСИ, 1989. – 64 с.
5. Хмара Л. А. Визначення теоретичного об'єму копання ґрунту однокішшевим экскаватором з телескопічним робочим обладнанням / Л. А. Хмара, О. О. Дахно // Строительство, материаловедение, машиностроение. – Днепропетровск : ПГАСА, 2012. – № 66.4.2. – С. 38–49.
6. Хмара Л. А. Телескопічне робоче обладнання гідравлічного экскаватора, оцінка його ефективності та визначення об'єму копання ґрунту / Л. А. Хмара, О. О. Дахно // Строительство, материаловедение, машиностроение. – Днепропетровск : ПГАСА, 2012. – № 66.4.2. – С. 29–37.
7. Хмара Л. А. Формування та оцінка ефективності телескопічного робочого обладнання однокішшевого гідравлічного экскаватора / Л. А. Хмара, О. О. Дахно // Строительство, материаловедение, машиностроение. – Днепропетровск : ПГАСА, 2012. – № 66.4.2. – С. 142–154.
8. Модернізація та підвищення продуктивності будівельних машин : монографія [Л. А. Хмара, М. П. Колісник, В. П. Станевський]. – Київ : Будівельник, 1992. – 152 с.
9. Машины для земляных работ : підручник [Л. А. Хмара, С. В. Кравець та ін.]. – Харків : ХНАДУ, 2014. – 548 с.

REFERENCES

1. Balovnev V.I. and Khmara L.A. *Intensifikatsiya razrabotki gruntov v dorozhnom stroitelstve* [Intensification of digging of soil in road construction]. Moscow : Transport Publ., 1993, 383 p. (in Russian).
2. Belyakov Y.I., Levinsohn A.L. and Galimullin V.A. *Zemlyaniye raboty* [Earthworks]. Moscow : Stroyizdat Publ., 1990, 281 p. (in Russian).
3. Garkavi N.G. *Mashinyi dlya zemlyanyih rabot* [Machines for earthworks]. Moscow : Higher School Publ., 1982, 335 p. (in Russian).
4. Tymoshenko V.K., Khmara L.A., Derevyanchuk M.I. and Kulik I.A. *Metodicheskie ukazaniya k vyipolneniyu kursovogo proekta «Odnokovshovyye gidravlicheskie ekskavatoryi» k distsipline «Mashinyi dlya zemlyanyih rabot» dlya studentov mehanicheskikh spetsialnostey* [Methodical instructions for implement the course of the project "Hydraulic excavators" for discipline "Machinery for earth works" for students of mechanical specialties]. Dnipropetrovsk : DCEI, 1989, 64 p. (in Russian).
5. Khmara L.A. and Dakhno O.O. *Vyznachennya teoretychnoho ob'yemu kopannya gruntu odnokivshevim ekskavatorom z teleskopichnym robochym obladnanniam* [Determination of theoretical volume of soil digging of excavator with the telescopic working equipment]. *Stroitel'stvo, materialovedenie, mashinostroenie* [Construction, Materials Science, Mechanical Engineering]. Dnipropetrovsk : PSACEA, 2012, no. 66.4.2, pp. 38–49. (in Ukrainian).
6. Khmara L.A. and Dakhno O.O. *Teleskopichne roboche obladnannya hidravlichnoho ekskavatora, otsinka yoho efektyvnosti ta vyznachennya ob'yemu kopannya gruntu* [The telescopic working equipment of hydraulic excavator, evaluation of its effectiveness

and determine of volume of digging soil]. *Stroitel'stvo, materialovedenie, mashinostroenie* [Construction, Materials Science, Mechanical Engineering]. Dnipropetrovsk : PSACEA, 2012, no. 66.4.2, pp. 29–37. (in Ukrainian).

7. Khmara L.A. and Dakhno O.O. *Formuvannya ta otsinka efektyvnosti teleskopichnoho robochoho obladnannya odnokivshevoho hidravlichnoho ekskavatora*. [The formation and evaluation of efficiency of telescopic working equipment of hydraulic excavator]. *Stroitel'stvo, materialovedenie, mashinostroenie* [Construction, Materials Science, Mechanical Engineering]. Dnipropetrovsk : PSACEA, 2012, no. 66.4.2, pp. 142–154. (in Ukrainian).

8. Khmara L.A., Kolisnyk M.P. and Stanevskyy V.P. *Modernizatsiya ta pidvyshchennya produktyvnosti budivel'nykh mashyn* [Modernization and increase productivity of construction machinery]. Kyiv : Budivelnyk Publ., 1992, 152 p. (in Ukrainian).

9. Khmara L.A., Kravets S.V. and others. *Mashyny dlya zemlyanyh rabit* [Machines for earthworks] Kharkiv : HNADU Publ., 2014, 548 p. (in Ukrainian).

Стаття рекомендована до публікації д-ром техн. наук, проф. В. Г. Заренбіним (Україна); д-ром техн. наук, проф. С. В. Шатовим (Україна)

Надійшла до редакції 13.09.2016

Прийнята до друку 27.10.2016