

УДК 621.879.33

ЕНЕРГЕТИЧНА ОПТИМІЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ КОΠΑННЯ ГРУНТУ ОДНОКІВШЕВИМ ЕКСКАВАТОРОМ ОСНАЩЕНИМ ТЕЛЕСКОПІЧНИМ РОБОЧИМ ОБЛАДНАННЯМ

ДАХНО О.О.¹, *аспірант*.

¹ Кафедра будівельних і дорожніх машин, Державний вищий навчальний заклад "Придніпровська державна академія будівництва та архітектури", вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпропетровськ, 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'язано з рядом специфічних особливостей, які обмежують використання в повній мірі технологічних можливостей робочого обладнання (РО) одноківшевого гідравлічного екскаватора (ОГЕ) та ефективності використання землерийної техніки. Таким чином, виникає потреба змінювати робочі траєкторії руху робочого органу в процесі копання. Традиційне РО має вузький діапазон зміни геометричних параметрів. У зв'язку з цим, виникає потреба у 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. Широкий діапазон 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. **Мета статті.** Розробити оптимізаційну математичну модель для визначення оптимальної товщини вирізаної стружки в умовах забезпечення стійкості та максимально можливих зусиль на різучій кромці ковша при копанні 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 при копанні ТРО ОГЕ дозволили досягти моделювання заданою категорії ґрунту підтриманням постійного значення питомого опору копанню ґрунту через регулювання товщини ґрунтової стружки при забезпеченні стійкості та максимально допустимого зусилля копання. Представлені 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 представлених математичних моделей дозволить зменшити енергоємність процесу копання та підвищити продуктивність ОГЕ.

Ключові слова: одноківшевий екскаватор, телескопічне робоче обладнання, енергетична оптимізація, копання ґрунту.

ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА КОПАНИЯ ГРУНТА ОДНОКОВШОВЫМ ЕКСКАВАТОРОМ ОСНАЩЕННЫМ ТЕЛЕСКОПИЧЕСКИМ РАБОЧИМ ОБОРУДОВАНИЕМ

ДАХНО О.А.¹, *аспірант*.

¹ Кафедра строительных и дорожных машин, Государственное высшее учебное заведение "Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры", ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днепропетровск, 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 эффективности 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 условиях обеспечения устойчивости и максимально возможных усилий на режущей кромке ковша при копании ОГЭ с изменяемыми геометрическими параметрами РО, в котором изменение параметров происходит за счет применения телескопических механизмов стрелы и рукояти. **Вывод.** Приведенные оптимизационные математические модели для определения максимально возможной толщины вырезаемой стружки при копании ТРО ОГЭ позволили достичь моделирования заданной категории грунта поддержанием постоянного значения удельного сопротивления грунта копанию через регулирование толщины грунтовой стружки при обеспечении устойчивости и максимально допустимого усилия копания. Представлены оптимизационные графики для движения по градиентной траектории с расчетной толщиной грунтовой стружки для изменения ординаты шарнира крепления рукояти, изменения длины телескопической части стрелы и изменения длины телескопической рукояти от изменения угла поворота телескопической рукояти показывают корректность моделей. Внедрение и использование представленных математических моделей позволит уменьшить энергоемкость процесса копания и повысить производительность ОГЭ.

Ключевые слова: одноковшовый экскаватор, телескопическое рабочее оборудование энергетическая оптимизация, копание грунта.

THE ENERGY OPTIMIZATION OF THE PROCESS OF DIGGING GROUND BY EXCAVATOR EQUIPPED WITH TELESCOPIC WORKING EQUIPMENT

DAKHNO O.O.¹, *postgraduate.*

¹ Department of Building and road machines. State Higher Education Establishment "Pridneprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-A, Chernishevskogo str., Dnipropetrovsk 49600, Ukraine, tel. +38 (066) 044-84-48, e-mail: olegdakhno@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-6916-4327

Summary. 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 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 smoothly and highly accurately change 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 to determine 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 the optimization mathematical models to determine the maximum thickness cut a shaving 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 a shaving thickness adjustment while ensuring the maximum stability and digging force. Submitted the optimization graphics for the motion on gradient calculated trajectory of thick ground a shaving to change ordinates hinge attachment the handle changes the length of the telescopic boom and changing the length of a telescopic the handle changes turning angle of the telescopic the handle indicate correct models. Implementation and use of the mathematical model will reduce energy consumption of the process and increase productivity digging excavator.

Keywords: excavator, telescopic working equipment, energy optimization, digging of ground

Постановка проблеми. Виконання землерийних робіт пов'язано з рядом специфічних особливостей, які обмежують використання в повній мірі технологічних можливостей робочого обладнання (РО) одноківшового гідравлічного экскаватора (ОГЕ) та ефективності використання

землерийної техніки. Таким чином, виникає потреба змінювати робочі траєкторії руху робочого органу в процесі копання. Традиційне РО має вузький діапазон зміни геометричних параметрів.

У зв'язку з цим, виникає потреба у 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.

Широкий діапазон 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 [1, 2, 3, 4, 5].

Мета статті. Розробити оптимізаційну математичну модель для визначення оптимальної товщини вирізаної стружки в умовах забезпечення стійкості та максимально можливих зусиль на ріжучій кромці ковша при копанні одноківшеvim 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 ріжучої кромки [6, 7, 8].

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

$$P_{01}^{ГР} = K_{ПТ}bh, \quad (1)$$

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

Нехай коефіцієнт питомого опору ґрунту копанню є постійним в процесі копання $K_{ПТ} = const$, а дотична складова опору ґрунту копанню на ріжучій кромці ковша $P_{01}^{ГР}$ 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]:

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

де k^* – коефіцієнт нормалі.

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

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

де P_h – аргумент товщини стружки h_{max} , $h_{max} = f(\varphi_1, \varphi_3, L_{ТЧС}, L_{ТР}, P_{01}, K_{СТ})$, 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:

$$h = |\overline{MM_1}| = \sqrt{(Y_{M_1} - Y_M)^2 + (X_{M_1} - X_M)^2}, \quad (6)$$

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

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

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

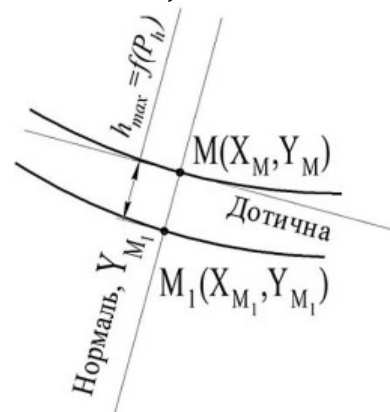


Рис. 1. Схема для визначення максимальної товщини стружки h_{max} .

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 $L_{Т.ЧС}$ та телескопічної рукояті $L_{Т.Р}$ розбиваємо траєкторію копання на n, m, l, u та w відрізків, відповідно:

$$\varphi_{1_i} = [\varphi_{1_{min}}, \varphi_{1_{max}}] \stackrel{\text{def}}{=} \{ \varphi_{1_i} \in \mathbb{R}: \varphi_{1_{min}} \leq \varphi_{1_i} \leq \varphi_{1_{max}} \}, \quad (9)$$

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

$$\varphi_{3_j} = [\varphi_{3_{min}}, \varphi_{3_{max}}] \stackrel{\text{def}}{=} \{ \varphi_{3_j} \in \mathbb{R}: \varphi_{3_{min}} \leq \varphi_{3_j} \leq \varphi_{3_{max}} \}, \quad (10)$$

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

$$\varphi_{4_z} = [\varphi_{4_{min}}, \varphi_{4_{max}}] \stackrel{\text{def}}{=} \{ \varphi_{4_z} \in \mathbb{R}: \varphi_{4_{min}} \leq \varphi_{4_z} \leq \varphi_{4_{max}} \}, \quad (11)$$

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

$$L_{Т.ЧС_k} = [L_{Т.ЧС_{min}}, L_{Т.ЧС_{max}}] \stackrel{\text{def}}{=} \left\{ \begin{array}{l} L_{Т.ЧС_k} \in \mathbb{R}: \\ L_{Т.ЧС_{min}} \leq L_{Т.ЧС_k} \leq L_{Т.ЧС_{max}} \end{array} \right\}, \quad (12)$$

$$\Delta L_{Т.ЧС_k} = \frac{L_{Т.ЧС_{max}} - L_{Т.ЧС_{min}}}{u};$$

$$L_{Т.Р_g} = [L_{Т.Р_{min}}, L_{Т.Р_{max}}] \stackrel{\text{def}}{=} \left\{ \begin{array}{l} L_{Т.Р_g} \in \mathbb{R}: \\ L_{Т.Р_{min}} \leq L_{Т.Р_g} \leq L_{Т.Р_{max}} \end{array} \right\}, \quad (13)$$

$$\Delta L_{Т.Р_g} = \frac{L_{Т.Р_{max}} - L_{Т.Р_{min}}}{w},$$

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

Застосуємо метод невизначених множників Лагранжа для створення цільової функції $h_{max} = f(\varphi_1, \varphi_3, L_{Т.ЧС}, L_{Т.Р}, P_{01}, K_{СТ})$ та знаходження умовних локальних екстремумів на кожному з цих відрізків, при відповідних значеннях в цих положеннях дотичної складової опору ґрунту копанню P_{01} та забезпеченні коефіцієнту стійкості $K_{СТ}$. Функція Лагранжа матиме вид:

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

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

$$\lambda_l[\omega_l] = \lambda_l \left[M_{УТ} - M_{ПЕР_{n,m}} \left(\begin{array}{l} \Delta\varphi_{1_i}, \Delta\varphi_{3_j}, \Delta L_{Т.ЧС_k} \\ \Delta L_{Т.Р_g}, P_{01_{ij}} \end{array} \right) \right], \quad (15)$$

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

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

Визначаємо дотичне зусилля $P_{01}^{\GammaЦ}$ на ріжучій кромці ковша (по зусиллю гідроциліндра) при копанні поворотом рукояті (рис. 7):

$$P_{01}^{\GammaЦ} = R_{Т.Р+К}^{-1} \left[\frac{P_H \pi D^2 \rho l (\varphi_{поч.} + \Delta\varphi_{3_j})}{4S} + G_{Т.Р} r_{G_{Т.Р}} + (G_K + S_{ij} b_K \gamma_{\Gamma}) r_{G_{K+\Gamma}} \right], \quad (16)$$

де $G_{НЧС}$, $G_{ТЧС}$, $G_{Т.Р}$, G_K – сили тяжіння разом з відповідними гідроциліндрами елементів ТРО та ковша; $r_{G_{НЧС}}$, $r_{G_{ТЧС}}$, $r_{G_{Т.Р}}$, $r_{G_{K+\Gamma}}$ – плечі відповідних сил визначаються за формулами (15) – (21); S_{ij} – площа повздовжнього перетину елемента вирізаної стружки.

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

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

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

$$r_{G_{Т.Р}} = L_{НЧС} \cos \varphi_1 + L_{ТЧС} \cos \Delta_1 + (L_{Т.Р} \cdot l_{G_{Т.Р}}) \cos \Delta_2; \quad (20)$$

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

$$r_{G_{K+\Gamma}} = L_{НЧС} \cos \varphi_1 + L_{ТЧС} \cos \Delta_1 + L_{Т.Р} \cos \Delta_2 + (R_K \cdot l_{G_{K+\Gamma}}) \cos \Delta_3; \quad (22)$$

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

де $l_{G_{НЧС}}$, $l_{G_{ТЧС}}$, $l_{G_{Т.Р}}$, $l_{G_{K+\Gamma}}$ – відповідно відсоткові коефіцієнти положення центру

ваги від довжини нижньої частини стріли, телескопічної частини стріли, телескопічної рукояті та ковша з ґрунтом [9, 10].

Поперечний 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''_{ij} ; $Y4$ – від точки M''_{ij} до M , тоді рівняння цих кривих відповідно дорівнюють:

$$Y1(x) = \sqrt{(L_{T.P.g} + r_K)^2 - (x - x_{B_{ij}})^2} + y_{B_{ij}}; \quad (24)$$

$$Y2(x) = \sqrt{r_K^2 - (x - x_{C_{(z+1)ij}})^2} + y_{C_{(z+1)ij}}; \quad (25)$$

$$Y3(x) = \sqrt{(L_{T.P.g} + r_K)^2 - (x - x_{B_{(i-1)j}})^2} + y_{B_{(i-1)j}}; \quad (26)$$

$$Y4(x) = \sqrt{r_K^2 - (x - x_{C_{zij}})^2} + y_{C_{zij}}. \quad (27)$$

При подальшому копанні ($y_{B_{ij}} > h_{III}$) утворюється крива $Y5$, яка відповідає крайнім положенням елементів ТРО, радіусом $R_{T.C+T.P+K}$:

$$Y5(x) = \sqrt{R_{T.C+T.P+K}^2 - (x - x_{M_i})^2}. \quad (28)$$

Таким чином, площа поперечного перетину вирізаної ґрунтової стружки S_{ij} із урахуванням коефіцієнтів розпушення ґрунту k_p та наповнення ковша k_H , при ($y_{B_{ij}} \leq h_{III}$), дорівнюватиме:

при ($y_{B_{ij}} \leq h_{III}$)

$$S_{ij} = \iint_D dx dy = \int_{x_{M_{ij}}}^{x_M} dx \int_{Y1(x)}^{Y4(x)} dy + \int_{x_{M'_{ij}}}^{x_{M_{ij}}} dx \int_{Y3(x)}^{Y2(x)} dy + \quad (29)$$

$$+ \int_{x_{M''_{ij}}}^{x_{M'_{ij}}} dx \int_{Y4(x)}^{Y3(x)} dy - \left(\frac{S_K \cdot k_H}{k_p} \right) = 0;$$

при $y_{B_{ij}} > h_{III}$

$$S'_{ij} = \iint_D dx dy = \int_{x_{M_{ij}}}^{x_M} dx \int_{Y1(x)}^{Y5(x)} dy + \quad (30)$$

$$+ \int_{x_{M'_{ij}}}^{x_{M_{ij}}} dx \int_{Y2(x)}^{Y1(x)} dy + \int_{x_{M''_{ij}}}^{x_{M'_{ij}}} dx \int_{Y3(x)}^{Y2(x)} dy - \left(\frac{S_K \cdot k_H}{k_p} \right) = 0;$$

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

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

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

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

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

$$M_{ПЕР} = f \left(\begin{matrix} \Delta\varphi_{1i}, \Delta\varphi_{3j}, \\ \Delta L_{T.Ck}, \Delta L_{T.P.g}, P_{01ij} \end{matrix} \right) = G_{HЧС}(r_{G_{HЧС}} - r_W) + G_{TЧС}(r_{G_{TЧС}} - r_W) + G_{T.P}(r_{G_{T.P}} - r_W) + (G_K + S_{ij} b_K \gamma_r)(r_{G_{K+r}} - r_W) + P_{01} \cos \theta (X_M - r_W); \quad (33)$$

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

На рисунку 2 представлені графіки залежності коефіцієнту стійкості $K_{СТ}$ від зміни кута повороту телескопічної рукояті φ_{3j} та місткості ковша q_i при копанні на максимальному вильоті телескопічних стріли та рукояті та ківшом місткістю $q_i=0.8$ м³, а також графіки залежності коефіцієнту стійкості $K_{СТ}$ та дотичної складової зусилля копання P_{01} від зміни кута повороту телескопічної рукояті φ_{3j} (рис. 3).

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

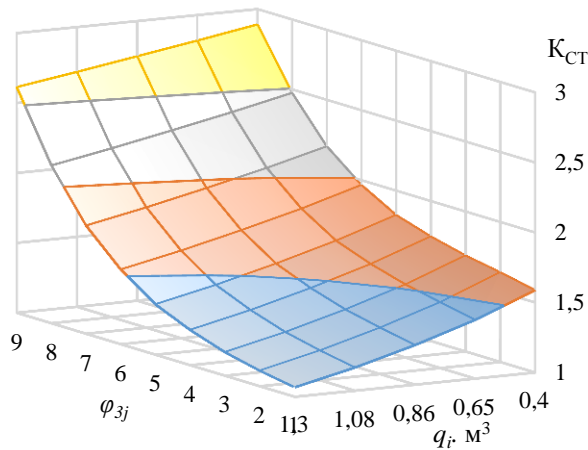


Рис. 2. Графік залежності коефіцієнту стійкості $K_{СТ}$ від зміни кута повороту телескопічної рукояті φ_{3j} та місткості ковша q_i .

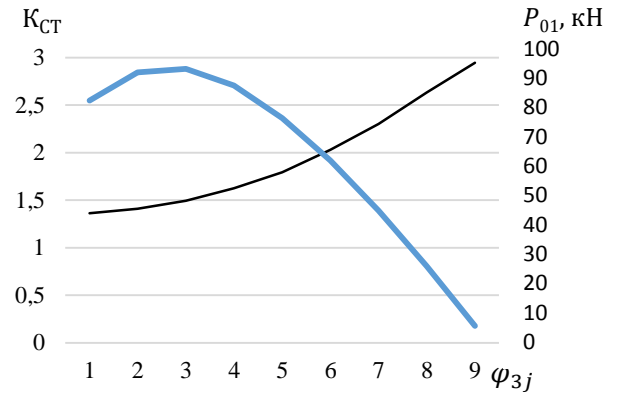


Рис. 3. Графіки залежності коефіцієнту стійкості $K_{СТ}$ та дотичної складової зусилля копання P_{01} від зміни кута повороту телескопічної рукояті φ_{3j} .

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

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

$$\lambda_3 [M_{УТ} - f(\Delta L_{Т.ЧСк})] = 0; \quad (37)$$

$$\lambda_4 [M_{УТ} - f(\Delta L_{Т.Рg})] = 0; \quad (38)$$

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

$$\Phi \left(\begin{matrix} \Delta\varphi_{1i}, \Delta\varphi_{3j}, \Delta L_{Т.ЧСк}, \Delta L_{Т.Рg}, P_{01ij} \\ \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4, \lambda_5 \end{matrix} \right) = \sum_{i=1}^5 \left[h \left(\begin{matrix} \Delta\varphi_{1i}, \Delta\varphi_{3j}, \\ \Delta L_{Т.ЧСк}, \Delta L_{Т.Рg}, P_{01ij} \end{matrix} \right) + \lambda_i \omega_i \right] \rightarrow \max, \quad (40)$$

$$\left\{ \begin{matrix} \frac{\partial \Phi}{\partial \Delta\varphi_{1i}} = 0, \\ \frac{\partial \Phi}{\partial \Delta\varphi_{3j}} = 0, \\ \frac{\partial \Phi}{\partial \Delta L_{Т.ЧСк}} = 0, \\ \frac{\partial \Phi}{\partial \Delta L_{Т.Рg}} = 0, \\ \frac{\partial \Phi}{\partial P_{01ij}} = 0, \\ \frac{\partial \Phi}{\partial \lambda_1} = 0, \\ \dots \\ \frac{\partial \Phi}{\partial \lambda_5} = 0. \end{matrix} \right. \quad (41)$$

Будуємо функції Лагранжа для визначення товщини ґрунтової стружки v , з умови забезпечення стійкості та максимального зусилля P_{01} на ріжучій кромці ковша, використовуючи невизначені множники (35)-(39):

-при копанні поворотом рукояті на кут $\Delta\varphi_{3j}$ з адаптацією кута $\Delta\varphi_{1i}$ та постійних розмірах телескопічної частини стріли та рукояті (рис. 4):

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

$$\left\{ \begin{matrix} \frac{\partial \Phi}{\partial \Delta\varphi_{1i}} = 0, \\ \frac{\partial \Phi}{\partial \Delta\varphi_{3j}} = 0, \\ \frac{\partial \Phi}{\partial P_{01ij}} = 0, \\ \frac{\partial \Phi}{\partial \lambda_1} = 0, \\ \dots \\ \frac{\partial \Phi}{\partial \lambda_3} = 0; \end{matrix} \right. \quad (43)$$

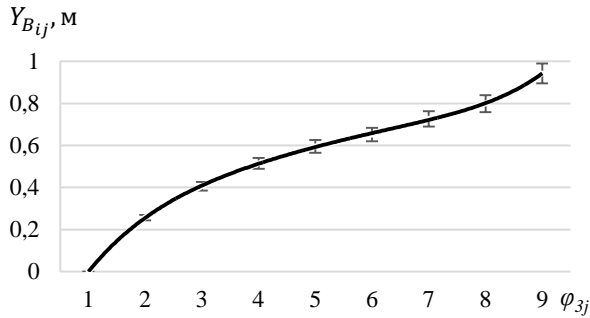


Рис. 4. Оптимізаційний графік зміни ординати точки В – шарніру кріплення рукояті від зміни кута повороту телескопічної рукояті φ_{3j} .

-при копанні поворотом рукояті на кут $\Delta\varphi_{3j}$ з адаптацією по довжині телескопічної частини стріли $\Delta L_{Т.ЧСк}$ та постійних розмірі телескопічної рукояті та кута $\Delta\varphi_{1i}$ (рис. 5):

$$\Phi(\Delta\varphi_{3j}, \Delta L_{Т.ЧСк}, P_{01ij}, \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) = \sum_{i=1}^3 [h(\Delta\varphi_{3j}, \Delta L_{Т.ЧСк}, P_{01ij}) + \lambda_i \omega_i] \quad (44)$$

$\rightarrow \max,$

$$\begin{cases} \frac{\partial \Phi}{\partial \Delta\varphi_{3j}} = 0, \\ \frac{\partial \Phi}{\partial \Delta L_{Т.ЧСк}} = 0, \\ \frac{\partial \Phi}{\partial P_{01ij}} = 0, \\ \frac{\partial \Phi}{\partial \lambda_1} = 0, \\ \dots \\ \frac{\partial \Phi}{\partial \lambda_3} = 0; \end{cases} \quad (45)$$

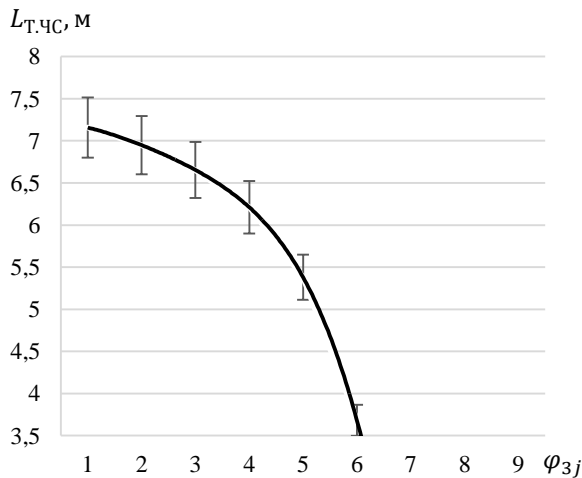


Рис. 5. Оптимізаційний графік зміни довжини телескопічної частини стріли $L_{Т.ЧС}$ від зміни кута повороту телескопічної рукояті φ_{3j} .

-при копанні поворотом рукояті на кут $\Delta\varphi_{3j}$ з адаптацією по довжині телескопічної рукояті $\Delta L_{Т.Рg}$ та постійних розмірі телескопічної стріли та кута $\Delta\varphi_{1i}$ (рис. 6):

$$\Phi(\Delta\varphi_{3j}, \Delta L_{Т.Рg}, P_{01ij}, \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) = \sum_{i=1}^3 [h(\Delta\varphi_{3j}, \Delta L_{Т.Рg}, P_{01ij}) + \lambda_i \omega_i] \quad (46)$$

$\rightarrow \max,$

$$\begin{cases} \frac{\partial \Phi}{\partial \Delta\varphi_{3j}} = 0, \\ \frac{\partial \Phi}{\partial \Delta L_{Т.Рg}} = 0, \\ \frac{\partial \Phi}{\partial P_{01ij}} = 0, \\ \frac{\partial \Phi}{\partial \lambda_1} = 0, \\ \dots \\ \frac{\partial \Phi}{\partial \lambda_3} = 0. \end{cases} \quad (47)$$

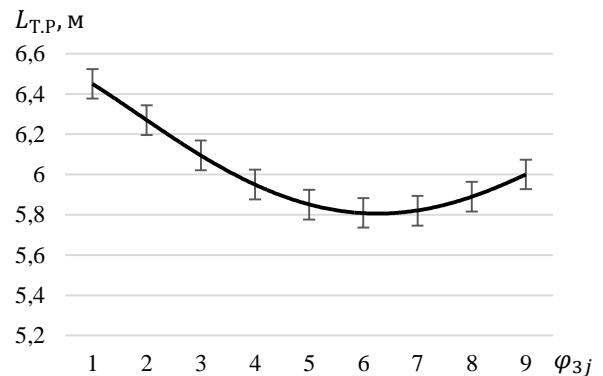


Рис. 6. Оптимізаційний графік зміни довжини телескопічної рукояті $L_{Т.Р}$ від зміни кута повороту телескопічної рукояті φ_{3j} .

Будуємо обмежуючу траєкторію копання через точки екстремумів кожній ділянці t руху точки M (рис. 7).

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

Висновок. Наведені оптимізаційні математичні моделі (40)-(47) для визначення максимально можливої товщини вирізаної стружки при копанні ТРО ОГЕ дозволили досягти моделювання заданою категорії

грунту підтриманням постійного значення питомого опору копанню ґрунту через регулювання товщини ґрунтової стружки при забезпеченні стійкості та максимально допустимого зусилля копання. Представлені 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 куту повороту телескопічної рукояті показують коректність моделей:

- для зміни куту 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 куту РО гідроциліндрами стріли.

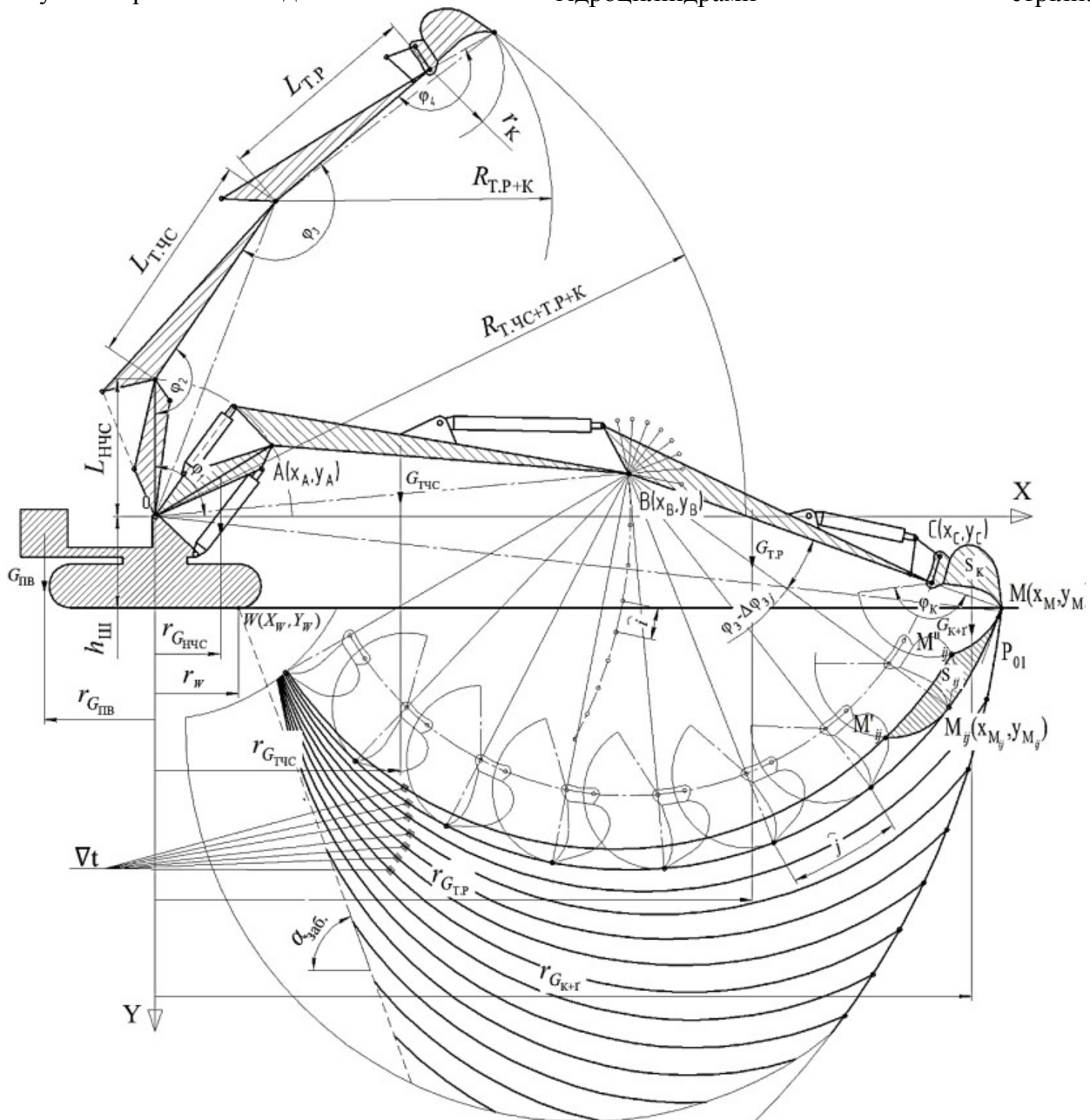


Рис. 7. Розрахункова схема для визначення траєкторій копання та товщини ґрунтової стружки: ∇t – градієнтні траєкторії; $\alpha_{заб}$ – кут забою, визначається у відповідності до категорії ґрунту.

Впровадження і використання дозволить зменшити енергоємність процесу представлених математичних моделей копання та підвищити продуктивність ОГЕ.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Баловнев В. И., Хмара Л. А. Интенсификация разработки грунтов в дорожном строительстве. – М.: Транспорт. 1993. – 383с.
2. Беляков Ю. И., Левинзон А. Л., Галимуллин В. А. Земляные работы, 2-е издание, переработанное и дополненное. – М.: Стройиздат, 1990, 281с.
3. Ветров Ю. А. Машины для земляных работ / Ветров Ю. А. // – 2-е изд., дораб. и доп. – К.: Вища школа. Головное изд-во, 1981. – 275с.
4. Гаркави Н. Г. Машины для земляных работ / Гаркави Н. Г. // – М.: Высш. шк. 1982. – 335с.
5. Тимошенко В.К., Хмара Л. А., Деревянчук М. И., Кулик И. А. Методические указания к выполнению курсового проекта «Одноковшовые гидравлические экскаваторы» к дисциплине «Машины для земляных работ» для студентов механических специальностей. – Д.: ДИСИ, 1989. – 64с.
6. Хмара Л. А., Дахно О. О. Визначення теоретичного об'єму копання ґрунту одноківшевим экскаватором з телескопічним робочим обладнанням. Сб. научных трудов: Строительство, материаловедение, машиностроение– Д.: ПГАСиА. 2012. №.66.4.2. – С. 38-49.
7. Хмара Л. А., Дахно О. О. Телескопічне робоче обладнання гідравлічного экскаватора, оцінка його ефективності та визначення об'єму копання ґрунту. Сб. научных трудов: Строительство, материаловедение, машиностроение. – Д.: ПГАСиА. 2012. №.66.4.2. – С. 29-37.
8. Хмара Л. А., Дахно О. О. Формування та оцінка ефективності телескопічного робочого обладнання одноківшевого гідравлічного экскаватора. Сб. научных трудов: Строительство, материаловедение, машиностроение. – Д.: ПГАСиА. 2012. №.66.4.2. – С. 142-154.
9. Хмара Л. А., Колісник М. П., Станевський В. П. Модернізація та підвищення продуктивності будівельних машин. – К.: Будівельник, 1992. – 152с.
10. Хмара Л. А., Кравець С. В. та інші. Машины для земляных работ: Навчальний посібник / Хмара Л. А., Кравець С.В. // Р., Д., Х. – 2010. – 557с.

REFERENCES

1. Balovnev V. I., Khmara L. A. *Intensifikatsiya razrabotki gruntov v dorozhnom stroitelstve* [Intensification of digging of soil in road construction]. – М.: Transport. 1993 – 383p.
2. Belyakov Y. I., Levinsohn A. L., Galimullin V. A. *Zemlyanyie raboty, 2-e izdanie, pererabotannoe i dopolnennoe* [Earthworks, 2nd edition, revised and enlarged]. – М.: Stroyizdat, 1990, 281p.
3. Vetrov Y. A. *Mashinyi dlya zemlyanyih rabot* [Machines for earthworks]. / Vetrov Y. A. // – 2nd ed., Revised. and enlarged. – К.: Higher School. Head Publishing House, 1981. – 275p.
4. Garkavi N. G. *Mashinyi dlya zemlyanyih rabot* [Machines for earthworks]. / Garkavi N. G. // - М.: Higher School. 1982. – 335p.
5. Tymoshenko V. K., Khmara L. A., Derevyanchuk M. I., Kulik I. A. *Metodicheskie ukazaniya k vyipolneniyu kursovogo proekta «Odnokovshovyie 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]. – Д.: DISI, 1989. – 64p.
6. Khmara L. A., Dakhno O. O. *Vyznachennya teoretychnoho ob"yemu kopannya gruntu odnokivshevym ekskavatorom z teleskopichnym robochym obladdannnyam* [Determination of theoretical volume of soil digging of excavator with the telescopic working equipment]. Coll. scientific works: Construction, materials science, mechanical engineering. – Д.: PSACEA, 2012. №.66.4.2. – P. 38-49.
7. Khmara L. A., Dakhno O. O. *Teleskopichne roboche obladdannya 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]. Coll. scientific works: Construction, materials science, mechanical engineering. – Д.: PSACEA, 2012. №.66.4.2. – P. 29-37
8. Khmara L. A., Dakhno O. O. *Formuvannya ta otsinka efektyvnosti teleskopichnoho robochoho obladdannya odnokivshevoho hidravlichnoho ekskavatora.* [The formation and evaluation of efficiency of telescopic working equipment of hydraulic excavator]. Coll. scientific works: Construction, materials science, mechanical engineering. – Д.: PSACEA, 2012. №.66.4.2. – P.142-154
9. Khmara L. A., Kolisnyk M. P., Stanevskyy V. P. *Modernizatsiya ta pidvyshchennya produktyvnosti budivel'nykh mashyn* [Modernization and increase productivity of construction machinery]. – К.: Budivelnik, 1992. – 152p.
10. Khmara L. A., Kravets S. V. and others. *Mashinyi dlya zemlyanyh rabit: navchalnyi posibnyk* [Machines for earthworks: Manual] / Khmara L. A, Kravets S. V. // R., D., H. - 2010. – 557p.