

УДК 624.132.3

**Кирикович В. Д., к.т.н., старший викладач, Нікітін В. Г., к.т.н., доцент** (Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне)

## **ВИЗНАЧЕННЯ КРИТИЧНОЇ ГЛИБИНИ РІЗАННЯ ПРИ КОМБІНОВАНОМУ ПОЯРУСНОМУ РІЗАННІ ҐРУНТУ**

**У статті викладені теоретичні дослідження впливу додаткового привантаження з боку зруйнованого ґрунту на критичну глибину поярусного різання ґрунту.**

**Ключові слова:** ґрунт, критична глибина, різання ґрунту.

У Національному університеті водного господарства та природокористування розроблений технологічний процес поярусної розробки ґрунту, який включає розробку ґрунту з відділенням від масиву в межах зони сколювання кожного ярусу.

На сьогодні відомо, що найменша енергомiсткiсть забезпечується при розробці ґрунту на критичну глибину. При цьому досліджений вплив степені блокованості різання ґрунту на величину останньої та вплив гiдростатичного тиску [1], разом з тим відсутні відомості впливу додаткового привантаження з боку зруйнованого ґрунту.

Для досліджень критичної глибини руйнування ґрунту при наявності додаткового привантаження з боку зруйнованого ґрунту скористаємося рис. 1. При цьому в якості вихідних передумов покладено:

1) ґрунт – однорідне ізотропне середовище, яке характеризується зчепленням, внутрішнім і зовнішнім тертям, щільністю і вологістю;

2) елемент стружки розглядаємо як тверде тіло у вигляді двох трикутних призм з двома симетричними конічними секторами по боках (рис. 1, в);

3) критична глибина різання постійна незалежно від того, працює ніж у режимі заглиблення чи в сталому режимі;

4) впливом швидкості різання і силою тяжіння ґрунту на опір його руйнування знехтувано [2], [3], [4];

5) закон розподілу нормального тиску на лобову площину ножа в зоні сколювання ґрунту прийнятий лінійним по глибині [4], [6];

6) мінімальний тиск  $q_o$ , що діє на денній поверхні визначається за формулою Алексєєвої Т.В. [7]. На критичній глибині він досягає максимального значення  $q_{кр}$  і визначається за формулою Паукера [8].



лена під кутом зовнішнього тертя ґрунту  $\varphi$  до нормалі лобової площини ножа; нормальна реакція  $dN_c$  і дотичні сили  $dT_c$  і  $2dT_{бок} \cos \delta$  в площині зсуву ґрунту; привантажуючі вертикальна та бокові сили  $dP_p$  і  $2dP_{бок}$  від тиску суспензного середовища. Тоді система рівнянь рівноваги всіх сил на нормальну ( $n$ ) і дотичну ( $\tau$ ) осі до лобової площини сколювання матиме вигляд:

$$\begin{cases} \sum P_n = dN_c + dN' \cos(\alpha_p + \varphi + \psi) - 2dP_{бок} \cos \gamma \cos \psi = 0; \\ \sum P_\tau = dT_c + 2dT_{бок} \cos \delta - dN' \sin(\alpha_p + \varphi + \psi) + 2dP_{бок} \cos \gamma \sin \psi = 0. \end{cases} \quad (1)$$

Закон розподілу нормального тиску ґрунту на ніж по глибині запишеться

$$q = q_o + \frac{q_{кр} - q_o}{h_{кр}} h = q_o + \frac{q_{кр} - q_o}{h_c} k_{неп} h, \quad (2)$$

де  $k_{неп}$  – відношення глибини зони гарантованого сколювання ґрунту  $h_c$  до критичної глибини різання  $h_{кр}$  ( $k_{неп} = 0,9 \dots 0,95$ );  $h$  – поточне значення глибини.

Елементарні дотичні сили, які діють у лобовій ( $dT_c$ ) і боковій ( $dT_{бок}$ ) площинах сколювання визначаються за законом Кулона для ґрунтів

$$dT_c = tg \varphi_o dN_c + cdF_c, \quad (3)$$

$$dT_{бок} = (\xi q \cos \rho \cos \lambda tg \varphi_o + c) dF_{бок}, \quad (4)$$

де  $dF_c$ ,  $dF_{бок}$  – елементарні площі відповідно лобової і бокової площин сколювання;  $\xi$  – коефіцієнт бокового тиску;  $c$  – коефіцієнт зчеплення ґрунту;  $\varphi_o$  – кут внутрішнього тертя;  $\rho$ ,  $\delta$ ,  $\lambda$  – кути, які утворюються боковою площиною сколювання з вертикальною площиною (рисунок, в).

У випадку, що розглядається, ґрунт руйнується переважно за рахунок деформації відриву, а тому на бокових площинах тіла сколу відсутні бічний тиск і сила тертя, тобто  $\xi q = 0$ , тоді

$$dT_{бок} = cdF_{бок}. \quad (5)$$

Максимальна ширина тіла сколу рівна (рисунок, б)

$$B_p = 2(h_c - h_{\kappa 1}) \operatorname{ctg} \gamma + b_c, \quad (6)$$

де  $h_{\kappa 1}$  – глибина розробки ґрунту в верхньому ярусі;  $\gamma$  – кут розвалу зон розпушування;  $b_c$  – ширина ножа.

Ширина тіла сколу по верху (рисунок, б)

$$B_1 = 2(h_c - 2h_{\kappa 1}) \operatorname{ctg} \gamma + b_c. \quad (7)$$

Тоді елементарні площі лобової і бокової площин сколювання будуть визначатись залежностями:

$$dF_c = [b_c + 2\rho(\operatorname{ctg} \alpha_p + \operatorname{ctg} \psi)(h_{c2} - h)] \frac{dh}{\sin \psi} + (2(h_c - 2h_{\kappa 1}) \operatorname{ctg} \gamma + b_c + 2h \cdot \operatorname{ctg} \gamma) \frac{dh}{\sin \psi} \quad (8)$$

$$dF_{\text{бок}} = r_c \frac{dh}{\cos \lambda} = (\operatorname{ctg} \alpha_p + \operatorname{ctg} \psi)(h_{c2} - h) \frac{dh}{\cos \lambda}. \quad (9)$$

Елементарні сили від тиску додаткового привантаження з боку зруйнованого ґрунту ( $dP_{\text{бок}}$ )

$$dP_{\text{бок}} = \frac{1}{3} \rho_c g h_{\text{н.ф}} \cdot dF_{\text{бок.тп}}, \quad (10)$$

де  $\rho_c$  – густина зруйнованого ґрунту;  $g$  – прискорення вільного тяжіння.

Тоді елементарна площа  $dF_{\text{бок.тп}}$  визначиться

$$dF_{\text{бок.тп}} = (\operatorname{ctg} \alpha_p + \operatorname{ctg} \psi)(h_c - h) \frac{dh}{\sin \gamma} - (\operatorname{ctg} \alpha_p + \operatorname{ctg} \psi)(h_{c2} - h) \frac{dh}{\sin \gamma}, \quad (11)$$

де  $\psi$  – кут сколювання ґрунту;  $\alpha_p$  – кут різання ґрунту;  $dh$  – елементарна глибина різання;  $r_c$  – поточне значення радіуса сколювання ґрунту.

Критична глибина розпушування ґрунту нижнього ярусу буде рівна:

$$h_{\kappa 2} = h_c / k_{\text{неп}} - h_{\kappa 1}. \quad (12)$$

Визначивши з першого рівняння системи (1)  $dN_c$  і підставивши вирази (3), (4) і (10) в друге рівняння системи (1) з врахуванням рівно-

стей (2), (5), (6), (7), (8), (9), (11), отримаємо рівняння:

$$\begin{aligned}
 & \operatorname{tg} \varphi_0 \left( -\frac{b_c \cos(\alpha_p + \varphi + \psi)}{\cos \varphi \sin \alpha_p} \left( q_0 + \frac{q_{kp} - q_0}{2h_{\kappa}} k_{nep} h \right) dh + \right. \\
 & + \frac{2}{3} \rho_c g h_{\kappa 1} [(ctg \alpha_p + ctg \psi)(h_c - h) - \\
 & - (ctg \alpha_p + ctg \psi)(h_{c2} - h)] ctg \gamma \cos \psi dh) + \\
 & + c \left\{ [b_c + 2\rho(ctg \alpha_p + ctg \psi)(h_{c2} - h)] \frac{dh}{\sin \psi} + \right. \\
 & + (2(h_c - 2h_{\kappa 1}) ctg \gamma + b_c + 2h \cdot ctg \gamma) \frac{dh}{\sin \psi} \left. \right\} + \\
 & + 2c \cdot (ctg \alpha_p + ctg \psi)(h_{c2} - h) \frac{dh}{\cos \lambda} \cos \delta - \\
 & - \frac{b_c \sin(\alpha_p + \varphi + \psi)}{\cos \varphi \sin \alpha_p} \left( q_0 + \frac{q_{kp} - q_0}{h_c} k_{nep} h \right) dh + \\
 & + \frac{2}{3} \rho_c g h_{\kappa 1} [(ctg \alpha_p + ctg \psi)(h_c - h) - \\
 & - (ctg \alpha_p + ctg \psi)(h_{c2} - h)] \sin \psi \cdot ctg \gamma \cdot dh = 0.
 \end{aligned} \tag{13}$$

При умові, що  $h_c = h_{kp} k_{nep}$ ,  $h_c = (h_{\kappa 2} + h_{\kappa 1}) k_{nep}$ ;  $h_{c2} = h_{\kappa 2} k_{nep}$ ;  $h_{c1} = h_{\kappa 1} k_{nep}$ , проінтегрувавши вираз (14), отримаємо квадратне рівняння:

$$\begin{aligned}
 & h_{\kappa 2}^2 \left[ \frac{k_{nep}^2 c}{\sin \psi} (b_c + \rho(ctg \alpha_p + ctg \psi) + 3ctg \gamma) k_{nep}^2 c (ctg \alpha_p + ctg \psi) \frac{\cos \delta}{\cos \lambda} \right] + \\
 & + h_{\kappa 2} \left[ -b_c (q_0 + (q_{kp} - q_0)) \frac{1}{2} k_{nep}^2 \times \right. \\
 & \left. \times \left( \frac{\operatorname{tg} \varphi_0 \cos(\alpha_p + \varphi + \psi) + \sin(\alpha_p + \varphi + \psi)}{\cos \varphi \sin \alpha_p} \right) \right] +
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & + \frac{2}{3} \rho_c g h_{\kappa 1}^2 (ctg \alpha_p + ctg \psi) ctg \gamma k_{nep}^2 (tg \varphi_0 \cos \psi + \sin \psi) + \\
 & + 6c \frac{ctg \gamma}{\sin \psi} k_{nep}^2 h_{\kappa 1} - 4c \frac{ctg \gamma}{\sin \psi} k_{nep} h_{\kappa 1} + c \frac{b_c}{\sin \psi} k_{nep} \left. \vphantom{\frac{2}{3}} \right] - \\
 & - \frac{1}{2} b_c k_{nep}^2 h_{\kappa 1} (q_0 + (q_{sp} - q_0)) \times \\
 & \times \left( \frac{tg \varphi_0 \cos(\alpha_p + \varphi + \psi) + \sin(\alpha_p + \varphi + \psi)}{\cos \varphi \sin \alpha_p} \right) + \\
 & \frac{1}{3} \rho_c g h_{\kappa 1}^3 (ctg \alpha_p + ctg \psi) ctg \gamma k_{nep}^2 (tg \varphi_0 \cos \psi + \sin \psi) + \\
 & + ch_{\kappa 1}^2 \frac{ctg \gamma}{\sin \psi} (3k_{nep}^2 - 4k_{nep}) + ck_{nep} h_{\kappa 1} \frac{b_c}{\sin \psi} = 0.
 \end{aligned} \tag{14}$$

З цього рівняння знайдемо критичну глибину розпушення ґрунту в нижніх ярусах

$$h_{\kappa 2} = \frac{-B_* + \sqrt{B_*^2 - 4A_*C_*}}{2A_*}, \tag{15}$$

де

$$\left\{ \begin{aligned}
 A_* &= \frac{k_{nep}^2 c}{\sin \psi} (b_c + \rho (ctg \alpha_p + ctg \psi) + 3ctg \gamma) k_{nep}^2 c (ctg \alpha_p + ctg \psi) \frac{\cos \delta}{\cos \lambda}; \\
 B_* &= -b_c (q_0 + (q_{sp} - q_0)) \frac{1}{2} k_{nep}^2 \times \left( \frac{tg \varphi_0 \cos(\alpha_p + \varphi + \psi) + \sin(\alpha_p + \varphi + \psi)}{\cos \varphi \sin \alpha_p} \right) + \\
 &+ \frac{2}{3} \rho_c g h_{\kappa 1}^2 (ctg \alpha_p + ctg \psi) ctg \gamma k_{nep}^2 (tg \varphi_0 \cos \psi + \sin \psi) + \\
 &+ 6c \frac{ctg \gamma}{\sin \psi} k_{nep}^2 h_{\kappa 1} - 4c \frac{ctg \gamma}{\sin \psi} k_{nep} h_{\kappa 1} + c \frac{b_c}{\sin \psi} k_{nep}; \\
 C_* &= -\frac{1}{2} b_c k_{nep}^2 h_{\kappa 1} (q_0 + (q_{sp} - q_0)) \times \left( \frac{tg \varphi_0 \cos(\alpha_p + \varphi + \psi) + \sin(\alpha_p + \varphi + \psi)}{\cos \varphi \sin \alpha_p} \right) + \\
 &+ \frac{1}{3} \rho_c g h_{\kappa 1}^3 (ctg \alpha_p + ctg \psi) ctg \gamma k_{nep}^2 (tg \varphi_0 \cos \psi + \sin \psi) + \\
 &+ ch_{\kappa 1}^2 \frac{ctg \gamma}{\sin \psi} (3k_{nep}^2 - 4k_{nep}) + ck_{nep} h_{\kappa 1} \frac{b_c}{\sin \psi}.
 \end{aligned} \right. \tag{16}$$

1. Кравец С. В. Определение критической глубины резания при комбинированном резании грунтов гидрофрезой. / С. В. Кравец, А. Л. Романовский, В. Д. Кирикович, С. С. Шварапа // Строительные и дорожные машины. – 2010. – № 5. – С. 47-49. 2. Производительность и долговечность землеройных мелиоративных машин / Баладинский В. Л., Пузырев Ю. В., Смирнов В. Н., Кисленко А. А. – К. : Урожай, 1988. – 152 с. 3. Станевский В. П. Совершенствование рабочего процесса землеройных машин / Станевский В. П. – К. : Вища школа. Изд-во при КГУ, 1984. – 128 с. 4. Баладинский В. Л. Механика рабочих процессов строительных машин / Баладинский В. Л., Баранников В. Ф., Ошпакаев Т. А. – Алма-Ата : ЛАФЦЧИПКС, 1982. 5. Томин Е. Д. Бестраншейное строительство закрытого дренажа / Томин Е. Д. – М. : Колос, 1981. – 240 с. 6. Зеленин А. Н. Машины для земляных работ / Зеленин А. Н., Баловнев В. И., Керов И. П. – М. : Машиностроение, 1975. – 424 с. 7. Дорожные машины. ч. I. Машины для земляных работ / Т. В. Алексеева, К. А. Артемьев, А. А. Бромберг и др. – М. : Машиностроение, 1972. – 504 с. 8. Маслов Н. Н. Основы инженерной геологии и механики грунтов / Маслов Н. Н. – М. : Высшая школа, 1976. – 511 с.

Рецензент: д.т.н., профессор Кравец С. В. (НУВГП)

---

**Kyrykovych V. D., Candidate of Engineering, Senior Lecturer,  
Nikitin V. H., Candidate of Engineering, Associate Professor** (National University of Water Management and Nature Resources Use, Rivne)

### **DETERMINATION OF THE CRITICAL DEPTH OF CUT IN THE COMBINED TIERED CUTTING SOIL**

**The article presents the theoretical study of the effect of additional load from the blasted soil the critical depth of cut tiered soil.**

**Keywords: soil, critical depth, cutting soil.**

---

**Кирикович В. Д., к.т.н., старший преподаватель, Никитин В. Г., к.т.н., доцент,** (Национальный университет водного хозяйства и природопользования, г. Ровно)

### **ОПРЕДЕЛЕНИЕ КРИТИЧЕСКОЙ ГЛУБИНЫ РЕЗКИ ПРИ КОМБИНИРОВАННОМ ПОЯРУСНОМ РЕЗАНИИ ГРУНТА**

**В статье изложены теоретические исследования влияния дополнительной нагрузки со стороны разрушенного грунта на критическую глубину поярусно резания грунта.**

**Ключевые слова: почва, критическая глубина, резания грунта.**

---