

ВИЗНАЧЕННЯ КРИТИЧНОЇ ГЛИБИНИ РІЗАННЯ ҐРУНТІВ ДЛЯ ЗЕМЛЕРИЙНИХ МАШИН

Кравець С. В., Лук'янчук О. П., Нечидюк А. А.

ВСТУП

Визначальними умовами для створення ґрунтозахисних та енергозберігаючих багатоярусних робочих органів є їх взаємодія із ґрунтом як середовищем експлуатації землерійно-ярусних машин.

Відомо, що процес механічної розробки талих ґрунтів супроводжується просторовою взаємодією робочого інструмента із середовищем і найбільш характерним поелементним відокремленням ґрунтової стружки за рахунок деформацій зсуву і відриву у верхньому ярусі та тільки за рахунок деформацій зрізу і зсуву в нижніх ярусах. Впливом швидкості на опір руйнуванню талих ґрунтів можна нехтувати, якщо її значення не перевищує 1,0 м/с^{1,2}.

Таким чином, модель ґрунту і схему його поярусного руйнування можна прийняти з такими допущеннями: ґрунт розглядається як суцільне однорідне ізотропне середовище, яке характеризується механічним складом, пластичністю, зчепленням, внутрішнім і зовнішнім тертям і щільністю; руйнування ґрунту проходить зазвичай за рахунок деформацій зрізу і зсуву після порушення рівноваги сил діючих на елемент стружки, котрий розглядається як тверде тіло, опір відокремлення якого від ґрунтового середовища не залежить від швидкості робочого інструмента.

1. Визначення критичної глибини різання при поярусній розробці ґрунтового середовища

Збільшення глибини різання ґрунту ножом у верхньому ярусі до $h < h_{кр}$ ($h_{кр}$ – критична глибина різання) призводить до зменшення енергоємності робочого процесу, тому що інтенсивність зростання

¹ Ветров Ю.А. Резание ґрунтов землерійними машинами. Москва : Машиностроение, 1972. 359 с.

² Кравець С.В., Кованько В.В., Лук'янчук О.П. Наукові основи створення землерійно-ярусних машин і підземнорухомих пристроїв : монографія. Рівне : НУВГП, 2015. 322 с.

опору різанню стає меншою, ніж площі поперечного перерізу щілини, яка нарізується. При $h > h_{кр}$ інтенсивність зростання опору різанню ножа збільшується за рахунок запресовки ґрунту в бічні стінки щілини, яка нарізується, а площа руйнування зменшується. Як результат, енергоємність робочого процесу підвищується³. На рис. 1 наведені закономірності зміни сили блокованого різання від ширини (рис. 1, а), глибини (рис. 1, б) різання й енергоємності блокованого різання (рис. 1, в). З останньої залежності випливає, що критичній глибині різання відповідає мінімальна енергоємність руйнування – величина, яка вимірюється енергією, необхідною для руйнування одиниці об'єму ґрунту.

Для усунення закритичної зони ущільнення ґрунту і зниження енергоємності робочого процесу формування щілини на глибину $h > h_{кр}$ повинне здійснюватися багатоярусними землерийними робочими органами (ЗРО), у яких висота ярусів не перевищує критичної глибини різання. Мінімальна кількість ярусів визначається з нерівності^{4,5}.

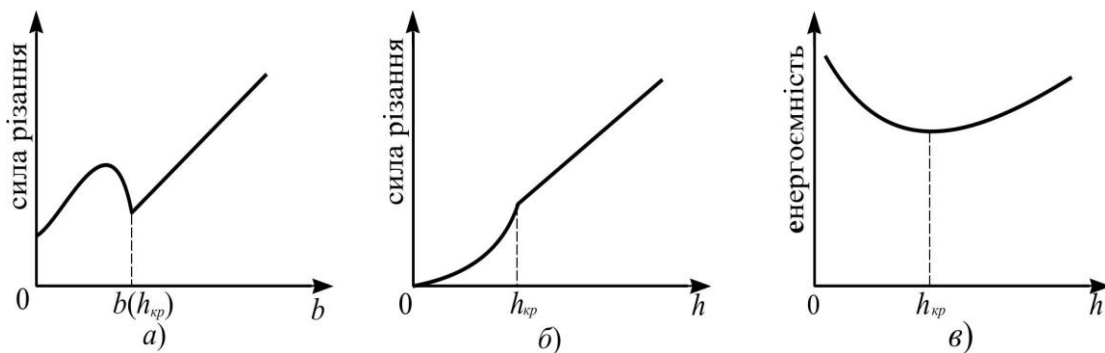


Рис. 1. Характерні залежності для блокованого руйнування ґрунту, які визначають критичну глибину різання:

*а – сили різання від ширини ножа; б – сили від глибини різання;
в – енергоємності від глибини різання*

³ Ветров Ю.А. Резание ґрунтов землеройными машинами. Москва : Машиностроение, 1972. 359 с.

⁴ Кравец С.В., Романовский А.Л. Перспективные направления в области создания бестраншейных дренажукладчиков. *Повышение эффективности использования мелиоративных земель* : тез. докл. респ. научн.-техн. конф. (Ровно, ноябрь 1984). Ровно, 1984. Ч. III. С. 81.

⁵ Кравец С.В., Ткачук В.Ф., Романовский А.Л., Нечидюк А.А. Основные принципы конструирования рабочих органов для глубокой разработки талых ґрунтов. *Механизация и автоматизация земляных работ* : сборник докл. XIV Межд. научн.-техн. конф. (Киев, 24–27 сентября 1991 г.). Киев, 1991. С. 260–262.

$$Z_{min} > 1 + \frac{H - h_{кр1}}{h_{кр2}}, \quad (1)$$

де H – повна глибина різання (глибина укладання); $h_{кр1,2}$ – критична глибина різання відповідно у верхньому і наступних нижніх ярусах.

Тому насамперед необхідно знати величину критичної глибини різання залежно від умов різання (верхній, нижній ярус), типу різання (блоковане, напівблоковане, вільне, комбіноване) та вихідних даних для найбільш ймовірних типів талих ґрунтів.

З цією метою розроблена розрахункова схема взаємодії найбільш поширеного прямолінійного ножа із ґрунтом (рис. 2, а, б)⁶. Прийняті такі припущення: 1) ґрунт – однорідне ізотропне середовище, яке характеризується зчепленням, внутрішнім і зовнішнім тертям, щільністю і вологістю; 2) елемент стружки розглядається як тверде тіло у вигляді трикутної призми із двома симетричними кінчними секторами по боках (рис. 2, в); 3) критична глибина різання постійна незалежно від того, працює ЗРО у режимі заглиблення або у сталому режимі; 4) впливом швидкості різання і силою тяжіння ґрунту на опір його руйнування знехтувано; 5) закон розподілу нормального тиску на лобову площину ножа в зоні зсуву ґрунту на денну поверхню прийнятий лінійним по глибині^{7,8,9,10}.

Розрахункова схема і третє припущення ґрунтується на такому положенні. Довжина контакту ножа із ґрунтом непорушеної структури в режимі заглиблення і при сталому режимі різання різна і впливає на об'єм елементів стружки й опір різанню, а не на критичну глибину.

У момент заглиблення ножа у ґрунт контакт між ними розповсюджується по всій глибині різання, довжина контакту максимальна, сколюється найбільший елемент стружки, а тому опір різанню

⁶ Ткачук В.Ф., Кравец С.В., Кравец Л.Б. Определение критической глубины резания грунта ножом. *Горн., строит., дор. и мелиорат. машины.* 1987. Вып. 40. С. 22–28.

⁷ Ветров Ю.А. Резание грунтов землеройными машинами. Москва: Машиностроение, 1972. 359 с.

⁸ Rathje I. Der Schnittvorgang im Sande. *Forschungsarbeiten auf dem Gebiete des Ingenieurwesens*, 1931, Н. 350.

⁹ Godwin R.I., Spoor G.J. Soil failure with narrow tines. *Agric Eng Res* 22, 1977. P. 213–228.

¹⁰ Зеленин А.Н., Баловнев В.И., Керов И.П. Машины для земляных работ. Москва: Машиностроение, 1975. 424 с.

грунту також найбільший. За сталого режиму різання контакт ножа із ґрунтом непорушеної структури розповсюджується не на всю глибину різання, а тому сколюються менші елементи стружки і знижується опір різанню¹¹.

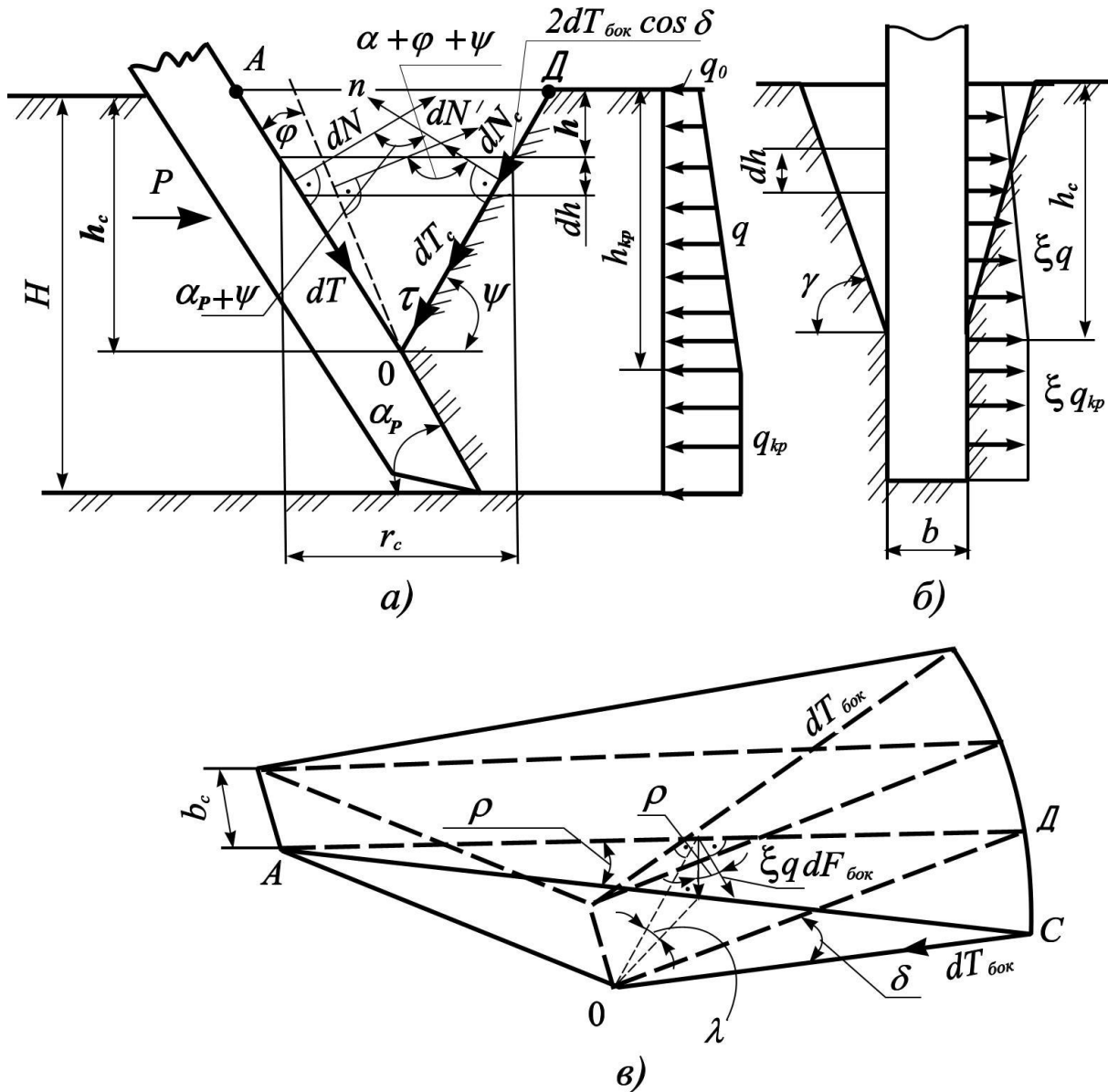


Рис. 2. Схема взаємодії ножа із ґрунтовим середовищем:
a – у поздовжній площині; *б* – у поперечній площині;
в – форма елемента стружки у процесі заглиблення ножа

¹¹ Godwin R.I., Spoor G.J. Soil failure with narrow tines. Agric Eng Res 22, 1977. P. 213–228.

Лінійний закон розподілу нормального тиску на лобову поверхню ножа можна обґрунтувати на основі теорії різання ґрунтів Ю.О. Ветрова¹². Згідно з цією теорією сила блокованого різання у верхньому ярусі за умови, що прорізь утворюється з боковими розширеннями, як показано на рис. 2, б ($\gamma < \frac{\pi}{2}$), дорівнює:

$$P(h) = \phi_{\alpha_p} m_{\epsilon} b_c h + 2m_{\text{бок.зр}} h + 2m_{\text{бок}} h^2, \quad (1a)$$

де ϕ_{α_p} – коефіцієнт, який враховує вплив кута різання ножа на опір вільного різання; m_{ϵ} – питома сила вільного різання ґрунту ножом із кутом різання 45° ; b_c , h – ширина ножа і глибина різання; $m_{\text{бок.зр}}$, $m_{\text{бок}}$ – коефіцієнти, які характеризують питому силу для подолання опору ґрунту зрізу боковими ребрами ножа і для руйнування ґрунту в бокових розширеннях прорізу.

З іншої сторони

$$P(h) = q(h) b_c h (1 + \text{tg} \phi \cdot \text{ctg} \alpha_p) = q(h) b_c h \frac{\sin(\alpha_p + \phi)}{\cos \phi \sin \alpha_p}. \quad (2)$$

Тоді середній нормальний тиск ґрунту на лобову поверхню ножа по глибині верхнього ярусу розподілиться таким чином:

$$q(h) = \frac{P \cos \phi \sin \alpha_p}{b_c h \sin(\alpha_p + \phi)} = \left(\phi_{\alpha_p} m_{\epsilon} + 2 \frac{m_{\text{бок.зр}}}{b_c} + 2 \frac{m_{\text{бок}}}{b_c} h \right) \times \frac{\cos \phi \sin \alpha_p}{\sin(\alpha_p + \phi)}, \quad (3)$$

де ϕ – кут зовнішнього тертя ґрунту.

У нижніх ярусах руйнування ґрунту може відбуватися як із утворенням бокових розширень ($\gamma < \frac{\pi}{2}$), якщо ширина ярусів

збільшується знизу до верху, так і без їх утворення ($\gamma = \frac{\pi}{2}$), якщо

ширина ярусів постійна по глибині. В останньому випадку вираз для сили різання в нижньому ярусі можна записати в такому вигляді:

$$P(h) = \phi_{\alpha_p} m_{\epsilon} b_c h + 2m_{\text{бок.зр}} h + 2m_{\text{бок.зс}} F_{\text{зс}}, \quad (4)$$

де $m_{\text{бок.зс}}$ – коефіцієнт, який характеризує питому силу руйнування ґрунту по бокових площинах зсуву $F_{\text{зс}} = \frac{h^2}{2} (\text{ctg} \alpha_p + \text{ctg} \psi)$ (див. рис. 2.2), де ψ – кут зсуву ґрунту в поздовжній площині.

¹² Ветров Ю.А. Резание ґрунтов землеройными машинами. Москва : Машиностроение, 1972. 359 с.

$$q(h) = \frac{P \cos \psi \sin \alpha_p}{b_c h \sin(\alpha_p + \psi)} =$$

$$= \left(\psi_{\alpha_p} m_b + 2 \frac{m_{\text{бок.зр}}}{b_c} + m_{\text{бок.зс}} (ctg \alpha_p + ctg \psi) \frac{h}{b_c} \right) \times \frac{\cos \psi \sin \alpha_p}{\sin(\alpha_p + \psi)}. \quad (5)$$

Таким чином, на основі проведеного обґрунтування та результатів експериментальних досліджень **можна вважати достовірним лінійний закон розподілу нормального тиску ґрунту на лобову поверхню ножа по глибині ярусу**^{13, 14, 15, 16}. Мінімальний тиск діє на денній поверхні¹⁷.

$$q_0 = c \cdot ctg \phi_0 (A_1 - 1), \quad (6)$$

а на критичній глибині він досягає максимально можливого значення по несучій спроможності ґрунту, за якого ґрунт втрачає стійкість, вираховується за формулою Паукера¹⁸.

$$q_{кр} = \left(\gamma_{зр} h_c + \frac{c}{tg \phi_0} \right) \times tg^4 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi_0}{2} \right), \quad (7)$$

де $\gamma_{зр}$, c – питома сила тяжіння і коефіцієнт зчеплення ґрунту; h_c – середня глибина сколювання ґрунту ножом; ϕ_0 – кут внутрішнього тертя; A_1 – коефіцієнт, який залежить від кута різання ножа, визначається за формулою В.В. Соколовського для проміжних граней¹⁷.

¹³ Томин В.Д. Бестраншейное строительство закрытого дренажа. Москва : Колос, 1981. 240 с.

¹⁴ Зеленин А.Н., Баловнев В.И., Керов И.П. Машины для земляных работ. Москва : Машиностроение, 1975. 424 с.

¹⁵ Полтавцев И.С., Орлов В.Б., Ляхович И.Ф. Специальные землеройные машины и механизмы для городского строительства. Киев : Будівельник, 1977. 136 с.

¹⁶ Уродов В.И. Физические основы глубокого резания грунтов. Минск : Наука и техника, 1972. 232 с.

¹⁷ Алексеева Т.В., Артемьев К.А., Бромберг А.А. и др. Машины для земляных работ. *Дорожные машины*. Москва : Машиностроение, 1972. Ч. 1. 504 с.

¹⁸ Маслов Н.Н. Основы инженерной геологии и механики грунтов. Москва : Высшая школа, 1976. 511 с.

$$A_1 = \frac{\cos \phi \left(\cos \phi + \sqrt{\sin^2 \phi_0 - \sin^2 \phi} \right) \times \left(\sin \phi_0 \cos \phi_\alpha + \sqrt{1 - \sin^2 \phi_0 \sin^2 \phi_\alpha} \right)^2}{\cos^2 \phi_0 (1 - \sin \phi_0)}, \quad (8)$$

$$\text{де } \phi_\alpha = \pi - \alpha_p - \frac{\phi}{2} - \frac{1}{2} \arcsin \frac{\sin \phi}{\sin \phi_0}.$$

На елементарний об'єм елемента стружки висотою dh в момент попередній сколюванню діють такі сили, які приведені у вертикальну площину ОАД (див. рис. 2, *a*); активна сила, $dN' = \frac{dN}{\cos \phi}$, направлена під кутом зовнішнього тертя ґрунту φ до нормалі лобової площини ножа; нормальна реакція dN_c і дотичні сили dT_c і $2dT_{\text{бок}} \cos \delta$ у площині зсуву ґрунту. Тоді система рівнянь рівноваги всіх сил на нормальну (n) і дотичну (τ) осі до лобової площини сколювання мають вигляд

$$\begin{cases} \sum P_n = dN_c + dN' \cos(\alpha_p + \phi + \psi) = 0; \\ \sum P_\tau = dT_c + 2dT_{\text{бок}} \cos \delta - dN' \sin(\alpha_p + \phi + \psi) = 0. \end{cases} \quad (9)$$

З першого рівняння системи (9) маємо

$$dN_c = -\frac{dN}{\cos \phi} \cos(\alpha_p + \phi + \psi) = -\frac{qb_c}{\cos \phi \sin \alpha_p} \cos(\alpha_p + \phi + \psi) dh, \quad (10)$$

де dh – елементарна глибина різання.

Закон розподілу нормального тиску ґрунту на ніж по глибині представимо у вигляді

$$q = q_0 + \frac{q_{kp} - q_0}{h_{kp}} h = q_0 + \frac{q_{kp} - q_0}{h_c} k_{\text{пер}} h, \quad (11)$$

де $k_{\text{пер}}$ – відношення глибини зони гарантованого сколювання ґрунту h_c до критичної глибини різання h_{kp} ($k_{\text{пер}}=0,9\dots0,95$); h – поточне значення глибини.

З урахуванням (11) вираз (10) переписеться таким чином:

$$dN_c = -\frac{\cos(\alpha_p + \phi_0 + \psi)}{\cos \phi \sin \alpha_p} b_c \left(q_0 + \frac{q_{kp} - q_0}{h_c} k_{\text{пер}} h \right) dh. \quad (12)$$

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

$$dT_c = tg\phi_0 dN_c + c dF_c, \quad (13)$$

$$dT_{бок} = (\xi q \cos \rho \cos \lambda tg\phi_0 + c) dF_{бок}, \quad (14)$$

де dF_c , $dF_{бок}$ – елементарні площі відповідно лобової та бокової площин сколювання; ξ – коефіцієнт бокового тиску; ρ , δ , λ – кути, які утворюються боковою площиною сколювання з вертикальною площиною (див. рис. 2, в). Елементарні площі відповідно дорівнюють:

$$dF_c = (b_c + 2\rho r_c) \frac{dh}{\sin \psi} = \left[b_c + 2\rho(ctg\alpha_p + ctg\psi)(h_c - h) \right] \frac{dh}{\sin \psi}, \quad (15)$$

$$dF_{бок} = r_c \frac{dh}{\cos \lambda} = (ctg\alpha_p + ctg\psi)(h_c - h) \frac{dh}{\cos \lambda}, \quad (16)$$

де r_c – поточне значення радіуса сколювання ґрунту.

Якщо підставити вирази (13) і (14) у друге рівняння системи (9) з урахуванням рівностей (12), (15) і (16), а потім проінтегрувати його в межах від 0 до h_c , то після проміжних математичних перетворень отримаємо:

$$\begin{aligned} & \left(ctg\alpha_p + ctg\psi \right) \left[\begin{aligned} & \zeta \left(q_0 + \frac{q_{кр} - q_0}{3} k_{неп} \right) \cos \delta \cos \rho tg\phi_0 + \\ & + \frac{c\rho}{\sin \psi} + c \frac{\cos \delta}{\cos \lambda} \end{aligned} \right] h_c = \\ & = \left(q_0 + \frac{q_{кр} - q_0}{2} k_{неп} \right) \left[\frac{\sin(\alpha_p + \phi + \psi)}{\cos \phi \sin \alpha_p} + tg\phi_0 \frac{\cos(\alpha_p + \phi + \psi)}{\cos \phi \sin \alpha_p} \right] b_c - \frac{c}{\sin \psi} b_c. \end{aligned} \quad (17)$$

Із рівняння (17) після нескладних тригонометричних перетворень визначимо математичну модель глибини h_c гарантованого сколювання ґрунту і критичної глибини різання

$$h_{кр} = \frac{h_c}{k_{неп}} = \frac{\left(q_0 + \frac{q_{кр} - q_0}{2} k_{неп} \right) \frac{\sin(\alpha_p + \phi + \psi)}{\cos \phi \cos \phi_0 \sin \alpha_p} - \frac{c}{\sin \psi}}{\left(ctg\alpha_p + ctg\psi \right) \left[\begin{aligned} & \zeta \left(q_0 + \frac{q_{кр} - q_0}{3} k_{неп} \right) \cos \delta \cos \rho \times \\ & \times tg\phi_0 + c \left(\frac{\rho}{\sin \psi} + \frac{\cos \delta}{\cos \lambda} \right) \end{aligned} \right] k_{неп}} \cdot b_c. \quad (18)$$

Кути ρ , δ , λ визначаються із геометричних співвідношень (див. рис. 2, в)

$$\cos \rho = \sqrt{1 - \left(\frac{\operatorname{ctg} \gamma}{\operatorname{ctg} \alpha_p + \operatorname{ctg} \psi} \right)^2}, \quad (19)$$

$$\cos \lambda = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\operatorname{ctg} \alpha_p \operatorname{ctg} \gamma}{\operatorname{ctg} \alpha_p + \operatorname{ctg} \psi} \right)^2}}, \quad (20)$$

$$\cos \delta = 1 - 2(\operatorname{ctg} \alpha_p + \operatorname{ctg} \psi)^2 \sin^2 \psi \sin^2 \frac{\rho}{2}, \quad (21)$$

де γ – кут нахилу бокових площин елемента стружки до горизонту $\left(\gamma = \frac{\pi}{4} + \frac{\phi_0}{2} \right)$.

Модель (18) може бути використана для визначення критичної глибини різання ґрунту як у верхньому ярусі, так і в наступних нижніх ярусах. Умови роботи ґрунторозробних органів у цих ярусах неідентичні. Верхній ґрунторозробний орган внаслідок впливу денної поверхні працює за умов блокованого різання й утворює прорізь із боковими розвалами, в яких ґрунт руйнується переважно за рахунок деформації відриву, а тому на бокових площинах елементів стружки відсутні бічний тиск і сили тертя утворюваних елементів стружки на масив ґрунту ($\zeta q = 0$). Верхній ґрунторозробний орган створює вільний простір з обмеженим розміром денної поверхні (шириною верхнього ярусу) для виходу ґрунту із нижнього ярусу. Внаслідок цього нижні ґрунторозробні органи формують щілину з бічними розвалами ($\rho > 0$), якщо ширина ярусів збільшується знизу до верху, або прямокутну щілину без розвалів ($\rho = 0$), якщо ширина ярусів незмінна. Формування щілини в нижніх ярусах здійснюється за рахунок деформації зрізу і зсуву, а тому на бічних площинах елементів стружки виникають нормальний тиск ($\zeta q > 0$) і сили тертя.

З урахуванням цих особливостей залежність (18) для визначення глибини сколювання ґрунту у верхньому і наступних нижніх ярусах переписеться у вигляді

$$h_{c_1} = \frac{\left(q_0 + \frac{q_{кр} - q_0}{2} k_{неп} \right) \frac{\sin(\alpha_p + \phi + \phi_0 + \psi)}{\cos \phi \cos \phi_0 \sin \alpha_p} - \frac{c}{\sin \psi}}{(ctg \alpha_p + ctg \psi) c \left(\frac{\rho}{\sin \psi} + \frac{\cos \delta}{\cos \lambda} \right)} b_{c_1}, \quad (22)$$

$$h_{c_2} = \frac{\left(q_0 + \frac{q_{кр} - q_0}{2} k_{неп} \right) \frac{\sin(\alpha_p + \phi + \phi_0 + \psi)}{\cos \phi \cos \phi_0 \sin \alpha_p} - \frac{c}{\sin \psi}}{(ctg \alpha_p + ctg \psi) \left[\zeta \left(q_0 + \frac{q_{кр} - q_0}{3} k_{неп} \right) tg \phi_0 + c \right]} b_{c_2}. \quad (23)$$

Математична модель (22) підтверджує експериментальні дані про прямо-пропорційний характер залежності критичної глибини різання від ширини ножа у верхньому ярусі^{19, 20}.

У залежностях (22) і (23) невідомим є параметр ψ . Визначимо його на основі того твердження, що кожний раз для $H \geq h_{кр1}$ значення кута сколювання ψ встановлюється таким, що опір відокремлення елементів стружки й опір різанню будуть мінімальні.

Опір ЗРО при глибокому різанні дорівнює^{21, 22}:

$$P = k_1 b_{c_1} h_{кр1} + k_2 b_{c_2} (H - h_{кр1}), \quad (24)$$

де k_1 , k_2 і b_{c_1} , b_{c_2} – питомий опір різанню і ширина ЗРО відповідно в докритичній і закритичній зонах; H – повна глибина різання ґрунту. Питомий опір різанню k_1 залежить від середнього нормального тиску ґрунту на лобову площину ЗРО в зоні сколювання $\left(q_{cp} = \frac{q_0 + q_{кр}}{2} \right)$, від кутів різання, загострення і зовнішнього тертя ґрунту. Величина k_2 визначається критичним значенням нормального тиску ґрунту на ЗРО $q_{кр}$, кутом зовнішнього тертя ґрунту та геометричними параметрами різального інструмента.

¹⁹ Ветров Ю.А. Резание ґрунтов землеройными машинами. Москва : Машиностроение, 1972. 359 с.

²⁰ Машины для земляных работ : учебник / Гаркави Н.Г., Аринченков В.И., Карпов В.В. и др. ; общ. ред. Н.Г. Гаркави. Москва : Высшая школа, 1982. 335 с.

²¹ Определение критической глубины резания ґрунта ножом / В.Ф. Ткачук, С.В. Кравец, Л.Б. Кравец. *Горн., строит., дор. и мелиорат. машины*. 1987. Вып. 40. С. 22–28.

²² Кравец С.В. Ґрунтозахисні та енергозберігаючі машини для прокладки підземних комунікацій. (Основи теорії, проектування та створення) : навчальний посібник. Рівне : Вид-во РДТУ, 1999. 278 с.

Дослідимо функцію (24) на екстремум по куту зсуву ґрунту ψ . Всі параметри, які входять у залежність (24), за винятком величини $h_{кр1}$, функціонально незалежні від кута ψ , тож екстремальна умова запишеться у вигляді

$$\frac{dP}{d\psi} = \frac{dh_{кр1}}{d\psi} (k_1 b_{c_1} - k_2 b_{c_2}) = 0. \quad (25)$$

Звідки $\frac{dh_{кр1}}{d\psi} = 0$; $h_{кр1} = \frac{h_{c_1}}{k_{пер}} = \max$, тому що $h_{кр1} \neq 0$ (*min*). Цей висно-

вок також впливає з епюри нормального тиску на лобову площину ЗРО (див. рис. 2, *a*). Мінімальний опір різанню можливий (при заданій глибині різання $H > h_{кр1}$) при мінімальній площі епюри нормального тиску, а це можливо, якщо $h_{кр1} = h_{c_1}/k_{пер} = \max$ і $h_{c_1} = \max$. Таким чином, **кут зсуву ґрунту визначається максимальним значенням глибини зони сколювання.**

Максимальні значення відносної глибини сколювання (h_c/b_c) і відповідні їм кути зсуву ґрунтів визначені для супіску, суглинку і глини для кутів різання ножа $\alpha_p = 20^\circ \dots 60^\circ$.

Характерні криві відносної глибини сколювання ґрунтів від кута зсуву для різних кутів різання ножа наведені на рис. 3. Залежність відносної глибини сколювання від кута різання ножа для ґрунтів другої та третьої категорії наведені на рис. 4 і 5 відповідно для верхнього і нижніх ярусів.

Розрахункові залежності показують, що **при зменшенні кута різання ножа від 60° до 20° відносна глибина сколювання (h_c/b_c) збільшується: у верхньому ярусі для ґрунтів другої категорії (твердий супісок, напівтвердий суглинок, тугопластична глина) від 1,73 до 7,35, а для ґрунтів третьої категорії (твердий суглинок і напівтверда глина) – від 1,70 до 5,80; в нижніх ярусах для ґрунтів другої категорії від 1,03 до 2,93, а для ґрунтів третьої категорії від 1,1 до 2,83.**

Аналіз розрахункових значень відносної глибини сколювання для ґрунтів із близькими фізико-механічними властивостями, але з різною вологістю (напівтвердий суглинок і тугопластична глина; твердий суглинок і напівтверда глина) показав, що **зі збільшенням вологості відносна глибина зменшується. Така залежність характерна і для збільшення коефіцієнтів зчеплення ґрунту (твердий супісок, твердий суглинок).**

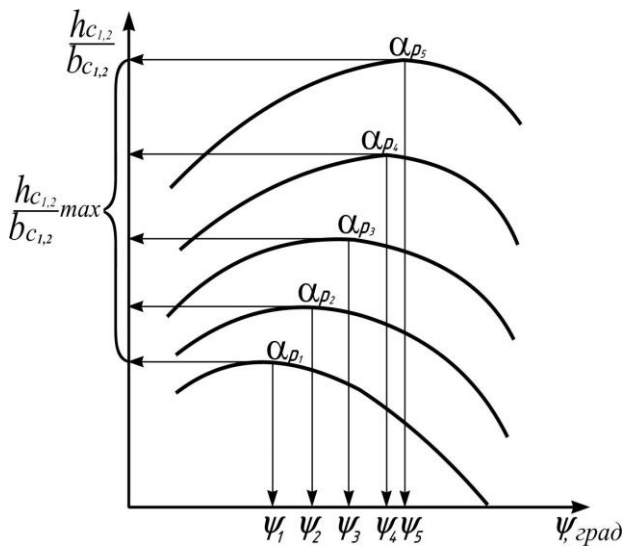


Рис. 3. Характерна залежність відносної глибини сколювання від поздовжнього кута зсуву ґрунту для різних кутів різання ножа

$$(\alpha_{p_1} > \alpha_{p_2} > \alpha_{p_3} > \alpha_{p_4} > \alpha_{p_5})$$

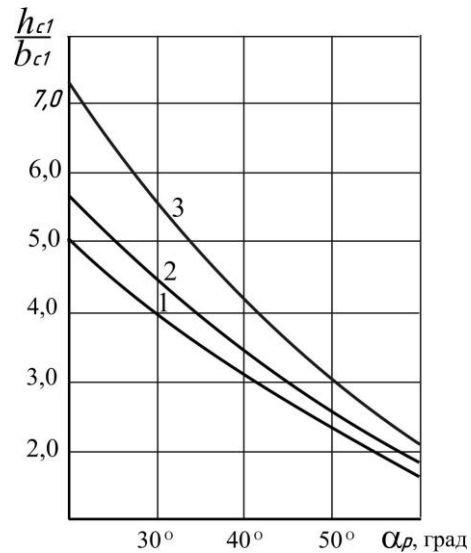


Рис. 4. Залежність відносної глибини сколювання ґрунтів від кута різання ножа у верхньому ярусі

(для $q_0 = 2c \cdot \operatorname{tg}(\pi/4 + \varphi_0/2)$):

1 – тугопластична і напівтверда глина; 2 – твердий і напівтвердий суглинок; 3 – твердий супісок

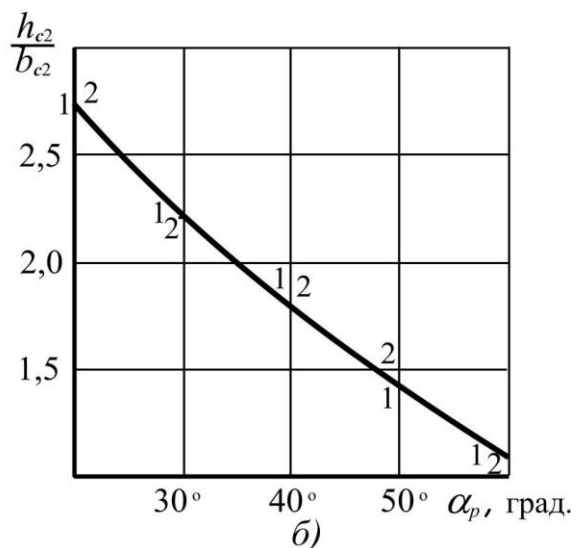
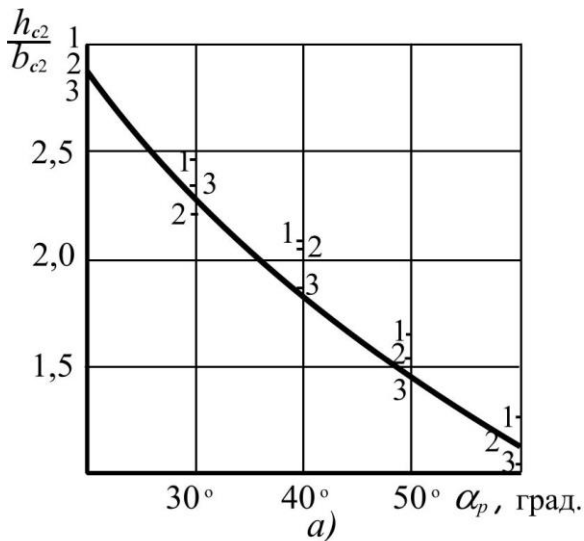


Рис. 5. Залежність відносної глибини сколювання ґрунтів від кута різання ножа в нижніх ярусах:

а) 1 – тугопластична глина; 2 – напівтвердий суглинок; 3 – твердий супісок; б) 1 – напівтверда глина; 2 – твердий суглинок

За незмінних параметрів ножа ($\alpha_p=30^\circ$) *відносна глибина зсуву для різних ґрунтів змінюється в межах: у верхньому ярусі від 4,0 до 5,65, а в нижніх ярусах – від 2,2 до 2,47.*

Таким чином, геометричні параметри ЗРО впливають більш суттєво на відносну глибину зсуву, ніж фізико-механічні параметри ґрунтів. Ця глибина з меншою інтенсивністю змінюється в нижніх ярусах, тому що в цих ярусах сколюються значно менші об'єми ґрунту. За інших рівних умов критична глибина різання ґрунту в нижніх ярусах у 1,5...1,9 разів менша, ніж у верхньому ярусі.

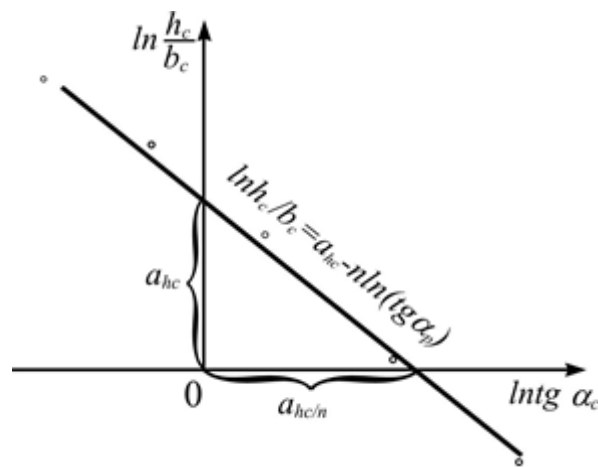


Рис. 6. Залежність відносної глибини сколювання ґрунту від тангенса кута різання ножа в логарифмічних координатах

Математичні моделі (18), (22) і (23) є громіздкими та незручними для вираховування критичної глибини різання. З метою їх спрощення проведемо апроксимацію в межах кута різання ножа $\alpha_p=20^\circ\dots60^\circ$. Для цього проведемо лінеаризацію функцій, наведених на рис. 4 і 5. Графіки функцій вирівнюються в координатах $\ln(\text{tg}\alpha_p)$ і $\ln h_c/b_c$ (рис. 6). Рівняння прямої в логарифмічних координатах має вигляд

$$\ln \frac{h_c}{b_c} = \alpha_{hc} - n \ln(\text{tg}\alpha_p). \quad (26)$$

Якщо провести потенціювання залежності (26), отримаємо:

$$\frac{h_c}{b_c} = \frac{e^{\alpha_{hc}}}{(\text{tg}\alpha_p)^n} = \frac{\alpha}{(\text{tg}\alpha_p)^n}, \quad (27)$$

де α_{hc} і n – коефіцієнти апроксимації, які залежать від фізико-механічних властивостей ґрунту.

Залежність кута зсуву ґрунту від кута різання ножа на рис. 3 достатньо точно інтерполюється лінійною залежністю

$$\psi = \alpha_{\psi} + k_{\psi} \alpha_p, \quad (28)$$

де α_{ψ} , k_{ψ} – коефіцієнти інтерполяції, котрі залежать від фізико-механічних властивостей ґрунту.

Коефіцієнти апроксимації та інтерполяції визначаються за методом найменших квадратів. Їх значення для верхнього і нижнього ярусів і широкого діапазону глинистих ґрунтів наведені у табл. 1.

Таблиця 1

**Значення апроксимуючих та інтерполюючих коефіцієнтів
для різних типів ґрунтів**

Тип ґрунту	α_1	n_1	α_2	n_2	$\alpha_{\psi 1}$	$k_{\psi 1}$	$\alpha_{\psi 2}$	$k_{\psi 2}$
Твердий супісок	3,504	0,794	$\frac{1,564}{1,681}$	$\frac{0,658}{0,704}$	0,986	-0,369	0,909	-0,302
Напівтвердий суглинок	2,921	0,711	1,654	0,593	1,175	-0,448	1,130	-0,396
Тугопластична глина	2,635	0,691	1,770	0,540	1,171	-0,429	1,048	-0,280
Твердий суглинок	2,955	0,718	$\frac{1,605}{1,650}$	$\frac{0,592}{0,626}$	1,079	-0,360	0,984	-0,303
Напівтверда глина	2,614	0,702	$\frac{1,659}{1,718}$	$\frac{0,581}{0,548}$	1,107	-0,360	1,024	-0,295

Примітка: індекс «1» – для верхнього ярусу; «2» – для нижніх ярусів; у знаменнику наведені значення для кута розвалу ярусів $\gamma = 80...82^\circ$.

Помилка апроксимації відносної глибини зсуву не перевищує 6,6%, а помилка інтерполяції кута зсуву – 3,8%.

Розроблена методика побудови математичних моделей (27), (28) дозволяє в кожному конкретному випадку на основі вихідних даних про талі ґрунти, що рекомендують БНіП, залежно від кута різання ножа в межах $20^\circ...60^\circ$ визначити (з достатньою для практичних розрахунків точністю) критичну глибину блокованого різання при поярусній розробці ґрунту.

Аналогічним чином отримано залежність глибини сколювання для напівблокованого різання відповідно до розрахункової схеми²³. Для верхнього ярусу $\xi q=0$.

$$h_{кр} = \frac{\left(q_0 + \frac{q_{кр} - q_0}{2} k_{неп} \right) \frac{\sin(\alpha_p + \varphi + \varphi_o + \psi)}{\cos \varphi \cos \varphi_o \sin \alpha_p} - \frac{c}{\sin \psi}}{\frac{ctg \alpha_p + ctg \psi}{2} \left[\xi \left(q_0 + \frac{q_{кр} - q_0}{3} k_{неп} \right) \cos \rho \cos \delta \operatorname{tg} \varphi_o + c \left(\frac{\rho}{\sin \psi} + \frac{\cos \delta}{\cos \lambda} \right) \right]} k_{неп} b_c. \quad (29)$$

Якщо порівняти залежності (22) і (29), то впливає висновок, що критична глибина для напівблокованого різання у 2 рази більша за критичну глибину блокованого різання ґрунтів.

2. Визначення критичної глибини різання при комбінованому поярусному руйнуванні ґрунту

Для дослідження критичної глибини комбінованого різання розглянемо процес руйнування ґрунту сколом на основі схеми (рис. 7). Як вихідні умови приймаємо припущення, наведені вище в п. 1.

Відповідно до теорії різання ґрунтів Ю.О. Ветрова та розрахункової схеми, наведеної на рис. 7, закон зміни нормального тиску на лобову поверхню ножа при блокованому різанні описується залежністю (2), а для вільного різання з урахуванням трапецеїдальної форми лобової площини зсуву²⁴

$$q_6 = \varphi_{\alpha_p} m_6 \left(1 + \frac{h_6}{b_k} \operatorname{ctg} \gamma \right) \frac{\cos \varphi \sin \alpha_p}{\sin(\alpha_p + \varphi)} \quad (30)$$

де $\varphi_{\alpha_p} m_6 \frac{\cos \varphi \sin \alpha_p}{\sin(\alpha_p + \varphi)} = q_0$ – мінімальне значення тиску, який діє на ніж

на денній поверхні; h_6 – глибина вільного різання ґрунту (див. рис. 7); b_k – ширина ґрунторозробного органа при комбінованому різанні ґрунту; γ – кут нахилу бічних стінок прорізу до горизонту.

²³ Кравець С.В., Кирикович В.Д., Блажієвський В.С. Визначення критичної глибини різання при напівблокованому різанні ґрунту. *Вісник Національного університету водного господарства та природокористування*. 2007. Вип. 3 (ч. 2). С. 220–225.

²⁴ Ветров Ю.А. Резание ґрунтов землеройными машинами. Москва: Машиностроение, 1972. 359 с.

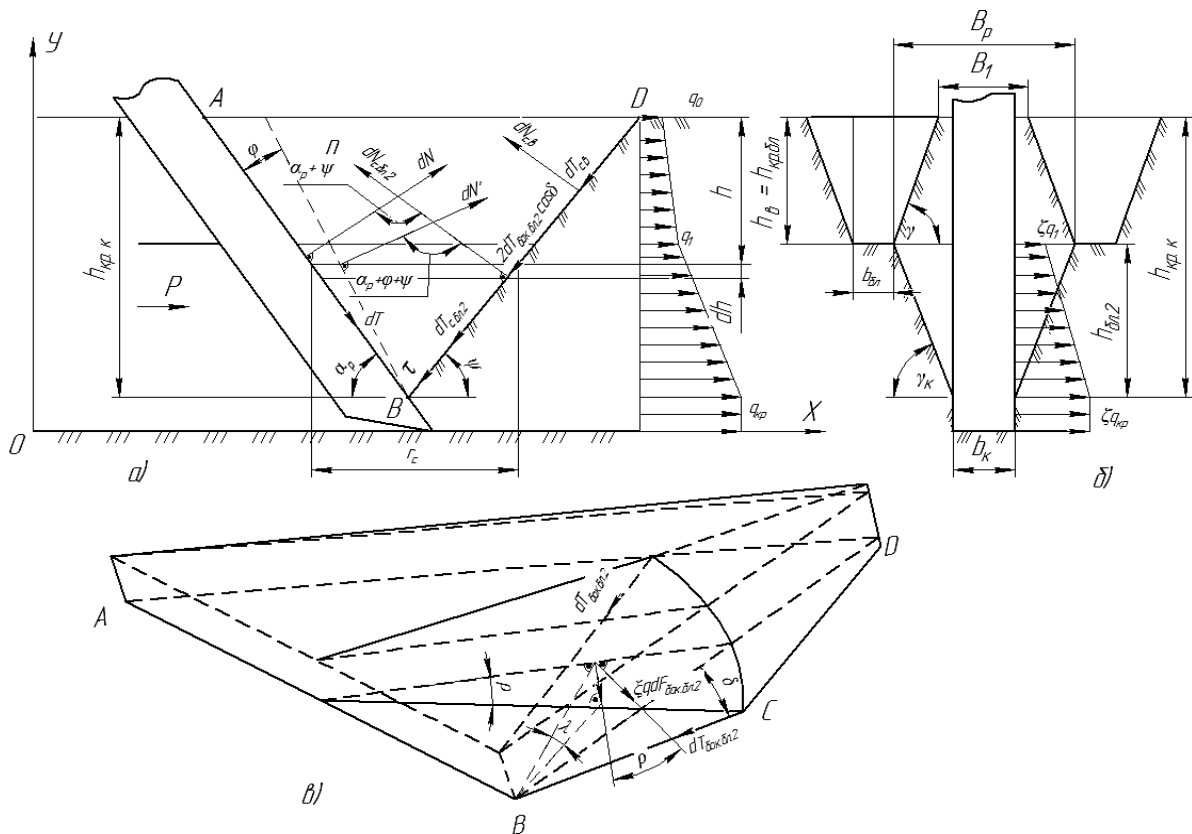


Рис. 7. Схема взаємодії ножа із ґрунтовим середовищем при комбінованому різанні ґрунту:

а) у повздожній площині; б) у поперечній площині; в) форма елемента стружки у процесі заглиблення ножа

Тому закон розподілу нормального тиску ґрунту на ґрунто-розробний орган при вільному різанні у верхньому ярусі визначається за формулою

$$q_s = q_0 \left(1 + \frac{h}{b_k} \operatorname{ctg} \gamma \right), \quad (31)$$

де h – поточне значення глибини різання при вільному різанні.

На елементарний об'єм елемента стружки висотою dh в момент попередній сколюванню діють такі сили, приведені у вертикальну площину ABD (рис. 7, а): активна сила $dN' = \frac{dN}{\cos \varphi}$,

кутом зовнішнього тертя ґрунту φ до нормалі лобової площини ножа; нормальна реакція $dN_{c.v}$ – для вільного різання і $dN_{c.bl}$ – для блокованого різання; і дотичні сили $dT_{c.v}$ – для вільного і $dT_{c.bl}$, $2 dT_{бок.бл} \cos \delta$ – для блокованого різання у площині зсуву ґрунту. Тоді система рівнянь рівноваги всіх сил на нормальну (n) і дотичну (τ) осі до лобової площини сколювання матиме вигляд:

$$\begin{cases} \Sigma P_n = dN_{c.г} + dN_{c.бл} + dN' \cos(\alpha_p + \varphi + \psi) = 0 \\ \Sigma P_n = dT_{c.г} + dT_{c.бл} + 2dT_{бок.бл} \cos \delta - dN' \sin(\alpha_p + \varphi + \psi) = 0, \end{cases} \quad (32)$$

де ψ – кут повздовжнього сколу ґрунту; δ – кут, що утворюється боковою площиною сколювання з вертикальною площиною (рис. 7, в)²⁵.

З першого рівняння системи (32) маємо:

$$\begin{aligned} dN_{c.г} + dN_{c.бл} &= -\frac{dN}{\cos \varphi} \cos(\alpha_p + \varphi + \psi) = \\ &= -\frac{qb_{\kappa}}{\cos \varphi \cdot \sin \alpha_p} \cos(\alpha_p + \varphi + \psi) dh, \end{aligned} \quad (33)$$

Закон розподілу нормального тиску ґрунту на ніж по глибині:

- для вільного різання (31),
- для блокованого різання:

$$q_{бл} = q_{г} + \frac{q_{кр} - q_{г}}{h_{бл.2}} k_{нер} h, \quad (34)$$

де $k_{нер}$ – відношення глибини зони гарантованого сколювання ґрунту ($k_{нер}=0,9 \dots 0,95$); h – поточне значення глибини.

З урахуванням (31), (34) вираз (33) перепишеться таким чином:

$$\begin{aligned} dN_{c.г} + dN_{c.бл} &= -\frac{\cos(\alpha_p + \varphi + \psi)}{\cos \varphi \cdot \sin \alpha_p} \cdot b_{\kappa} \cdot q_0 \cdot \left(1 + \frac{h}{b_{\kappa}} \operatorname{ctg} \gamma\right) dh - \\ &-\frac{\cos(\alpha_p + \varphi + \psi)}{\cos \varphi \cdot \sin \alpha_p} \cdot b_{\kappa} \cdot \left(q_{г} + \frac{q_{кр} - q_{г}}{h_{бл.2}} k_{нер} h\right) dh. \end{aligned} \quad (35)$$

Елементарні дотичні сили, які діють у лобовій ($dT_{c.г}$, $dT_{c.бл}$) і боковій ($dT_{бок.бл}$) площинах сколювання, визначаються по закону Кулона для ґрунтів.

$$dT_{c.г} = \operatorname{tg} \varphi_0 dN_{c.г} + cdF_{c.г}; \quad (36) \quad dT_{c.бл} = \operatorname{tg} \varphi_0 dN_{c.бл} + cdF_{c.бл}; \quad (37)$$

$$dT_{бок.бл} = (\xi q \cos \rho \cos \lambda \operatorname{tg} \varphi_0 + c) dF_{c.бок.бл}, \quad (38)$$

де $dF_{c.г}$, $dF_{c.бл}$, $dF_{бок.бл}$, – елементарні площі відповідно лобової площини сколювання при вільному і блокованому різанні та бокової площини сколювання при блокованому різанні; ρ , λ , – кути, які

²⁵ Кравець С.В. Ґрунтозахисні та енергозберігаючі машини для прокладки підземних комунікацій. (Основи теорії, проектування та створення): навчальний посібник. Рівне: Вид-во РДТУ, 1999. 278 с.

утворюються боковою площиною сколювання з вертикальною площиною (рис. 7, в).

Максимальна B_p і мінімальна B_l ширини тіла сколу рівні (рис. 7, б):

$$B_p = 2h_{\text{ол.2}} \text{ctg} \gamma_{\kappa} + b_{\kappa}; \quad (39)$$

$$B_l = 2h_{\text{ол.2}} \text{ctg} \gamma_{\kappa} + b_{\kappa} - 2h_{\text{б}} \text{ctg} \gamma; \quad (40)$$

де γ_{κ} – кут нахилу бічних стінок прорізу до горизонту в нижньому ярусі.

Елементарні площі будуть визначатися залежностями:

$$dF_{\text{с.б}} = (2h_{\text{ол.2}} \text{ctg} \gamma_{\kappa} - h_{\text{б}} \text{ctg} \gamma + b_{\kappa} + h \text{ctg} \gamma) \frac{dh}{\sin \psi}; \quad (41)$$

$$dF_{\text{с.бл}} = (b_{\kappa} + 2\rho r_c) \frac{dh}{\sin \psi} = (b_{\kappa} + 2\rho (\text{ctg} \psi + \text{ctg} \alpha_p) \cdot (h_{\text{ол.2}} - h)) \frac{dh}{\sin \psi}; \quad (42)$$

$$dF_{\text{оок.бл}} = r_c \frac{dh}{\cos \lambda} = (\text{ctg} \psi + \text{ctg} \alpha_p) \cdot (h_{\text{ол.2}} - h) \frac{dh}{\cos \lambda}, \quad (43)$$

де r_c – поточне значення радіуса сколювання ґрунту.

Критична глибина при комбінованому поярусному руйнуванні ґрунту буде рівна:

$$h_{\text{кр.к}} = h_{\text{б}} + h_{\text{ол.2}}. \quad (44)$$

Якщо підставити вирази (35), (36), і (37) в друге рівняння системи (32) з урахуванням рівностей (33), (31), (41), (42) і (43), отримаємо рівняння:

$$\begin{aligned} & -\text{tg} \varphi_0 \frac{\cos(\alpha_p + \varphi + \psi)}{\cos \varphi \sin \alpha_p} b_{\kappa} \cdot q_0 \cdot \left(1 + \frac{h}{b_{\kappa}} \text{ctg} \gamma \right) dh + \\ & + c \cdot \left(\frac{2h_{\text{ол.2}} \text{ctg} \gamma_{\kappa} - h_{\text{б}} \text{ctg} \gamma + b_{\kappa} + h \text{ctg} \gamma}{\sin \psi} \right) dh - \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& -tg\varphi_0 \frac{\cos(\alpha_p + \varphi + \psi)}{\cos\varphi \sin\alpha_p} b_\kappa \cdot \left(q_\varepsilon + \frac{q_{kp} - q_\varepsilon}{h_{\text{ол.2}}} k_{nep} h \right) dh + \\
& + c \cdot \left(\frac{b_\kappa + 2\rho(ctg\psi + ctg\alpha_p)}{\times(h_{\text{юл.2}} - h)} \right) \frac{dh}{\sin\psi} + 2\cos\delta \cdot \xi \cdot \left(q_\varepsilon + \frac{q_{kp} - q_\varepsilon}{h_{\text{ол.2}}} k_{nep} h \right) \times \\
& \times \cos\rho \cdot \cos\lambda \cdot tg\varphi_0 (ctg\psi + ctg\alpha_p) (h_{\text{ол.2}} - h) \frac{dh}{\cos\lambda} + \\
& + 2\cos\delta \cdot c \cdot (ctg\psi + ctg\alpha_p) (h_{\text{ол.2}} - h) \frac{dh}{\cos\lambda} - \frac{\sin(\alpha_p + \varphi + \psi)}{\cos\varphi \sin\alpha_p} b_\kappa \times \\
& \times q_0 \cdot \left(1 + \frac{h}{b_\kappa} ctg\gamma \right) dh - \frac{\sin(\alpha_p + \varphi + \psi)}{\cos\varphi \sin\alpha_p} b_\kappa \cdot \left(q_\varepsilon + \frac{q_{kp} - q_\varepsilon}{h_{\text{ол.2}}} k_{nep} h \right) dh = 0.
\end{aligned} \tag{45}$$

Після інтегрування та перетворень рівняння (45) отримаємо рівняння для визначення критичної глибини при комбінованому різанні ґрунту з урахуванням бічного тиску та сили бічного тертя у нижньому ярусі ($\gamma > \gamma_\kappa$, $\xi q > 0$):

$$h_{kp,\kappa} = \frac{-B - \sqrt{B^2 - 4 \cdot A \cdot C}}{2 \cdot A}; \tag{46}$$

$$\left\{ \begin{aligned}
& A = (ctg\psi + ctg\alpha_p) \times \\
& \times \left(\frac{c\rho}{\sin\psi} + 2 \cdot \cos\delta \cdot \cos\rho \cdot tg\varphi_0 \cdot \xi \cdot \left(\frac{3q_\varepsilon + (q_{kp} - q_\varepsilon)k_{nep}}{6} \right) + \frac{c \cdot \cos\delta}{\cos\lambda} \right); \\
& B = -\frac{\sin(\alpha_p + \varphi + \varphi_0 + \psi)}{\cos\varphi \cos\varphi_0 \sin\alpha_p} b_\kappa \left(q_\varepsilon + \frac{q_{kp} - q_\varepsilon}{2} k_{nep} \right) - 2h_\varepsilon (ctg\psi + ctg\alpha_p) \times \\
& \times \left(\frac{c\rho}{\sin\psi} + 2 \cdot \cos\delta \cdot \cos\rho \cdot tg\varphi_0 \cdot \xi \cdot \left(\frac{3q_\varepsilon + (q_{kp} - q_\varepsilon)k_{nep}}{6} \right) + \frac{c \cdot \cos\delta}{\cos\lambda} \right) + \\
& + (2h_\varepsilon ctg\gamma_\kappa + b_\kappa) \frac{c}{\sin\psi}; \\
& C = -h_\varepsilon \frac{\sin(\alpha_p + \varphi + \varphi_0 + \psi)}{\cos\varphi \cos\varphi_0 \sin\alpha_p} b_\kappa \cdot \left(q_0 \left(1 + \frac{h_\varepsilon}{2b_\kappa} ctg\gamma \right) - \left(q_\varepsilon + \frac{q_{kp} - q_\varepsilon}{2} k_{nep} \right) \right) - \\
& - \left(2h_\varepsilon^2 ctg\gamma_\kappa + \frac{h_\varepsilon^2}{2} ctg\gamma \right) \frac{c}{\sin\psi} + h_\varepsilon^2 \left(\frac{c\rho}{\sin\psi} + 2 \cdot \cos\delta \cdot \cos\rho \cdot tg\varphi_0 \cdot \xi \times \right. \\
& \left. \times \left(\frac{3q_\varepsilon + (q_{kp} - q_\varepsilon)k_{nep}}{6} \right) + \frac{c \cdot \cos\delta}{\cos\lambda} \right) \times \\
& \times (ctg\psi + ctg\alpha_p).
\end{aligned} \right. \tag{47}$$

За умови, що кут γ рівний куту бокового зміщення ґрунто-розробних органів нижнього ярусу відносно верхнього ($\gamma = \gamma_k$), то на бокових стінках елемента стружки відсутній бічний тиск ($\xi \cdot q=0$) і сили бічного тертя. У такому разі коефіцієнти для визначення критичної глибини комбінованого різання запишуться у вигляді:

$$\left\{ \begin{aligned} A &= (\operatorname{ctg}\psi + \operatorname{ctg}\alpha_p) \cdot c \cdot \left(\frac{\rho}{\sin\psi} + \frac{\cos\delta}{\cos\lambda} \right); \\ B &= -\frac{\sin(\alpha_p + \varphi + \varphi_0 + \psi)}{\cos\varphi \cos\varphi_0 \sin\alpha_p} b_k \left(q_0 + \frac{q_{kp} - q_0}{2} k_{nep} \right) - 2h_0 (\operatorname{ctg}\psi + \operatorname{ctg}\alpha_p) \cdot c \times \\ &\times \left(\frac{\rho}{\sin\psi} + \frac{\cos\delta}{\cos\lambda} \right) + (2h_0 \operatorname{ctg}\gamma_k + b_k) \frac{c}{\sin\psi}; \\ C &= -h_0 \frac{\sin(\alpha_p + \varphi + \varphi_0 + \psi)}{\cos\varphi \cos\varphi_0 \sin\alpha_p} b_k \cdot \left(q_0 \left(1 + \frac{h_0}{2b_k} \operatorname{ctg}\gamma \right) - \left(q_0 + \frac{q_{kp} - q_0}{2} k_{nep} \right) \right) + \\ &+ (-2h_0^2 \operatorname{ctg}\gamma_k - h_0^2 \operatorname{ctg}\gamma) \frac{c}{\sin\psi} + h_0^2 (\operatorname{ctg}\psi + \operatorname{ctg}\alpha_p) \cdot c \cdot \left(\frac{\rho}{\sin\psi} + \frac{\cos\delta}{\cos\lambda} \right). \end{aligned} \right. \quad (48)$$

Графіки залежності критичної глибини комбінованого різання від ширини різання (рис. 8) підтверджує експериментальні дані про прямопропорційну залежність між глибиною та шириною різання^{26, 27}.

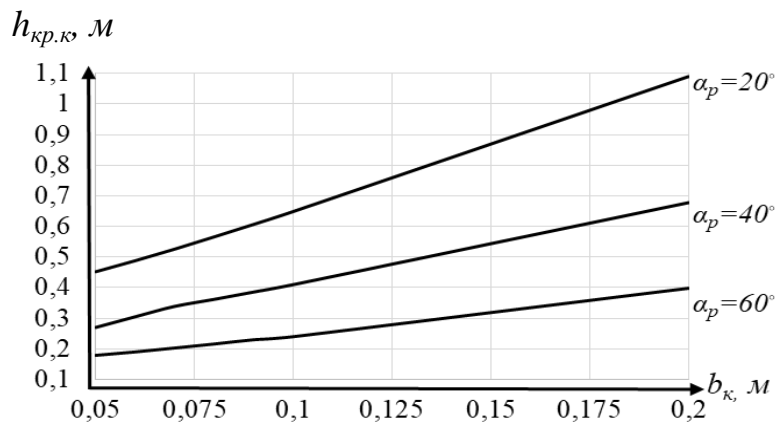


Рис. 8. Залежність критичної глибини комбінованого різання ґрунту $h_{кр,к}$ від ширини різання b_k прийнявши ($b_{0л}=0,05$) для напівтвердого суглинку при різних кутах різання при $\gamma = \gamma_k$

²⁶ Ветров Ю.А. Резание ґрунтов землеройными машинами. Москва : Машиностроение, 1972. 359 с.

²⁷ Артемьев К.А. Теория резания ґрунтов землеройно-транспортными машинами. Омск : ОмПИ, 1989. 80 с.

Залежність кута повздовжнього зсуву ґрунту від кута різання ґрунторозробного органу для різних типів ґрунту (рис. 9) достатньо точно інтерполюється лінійною залежністю:

$$\psi = a_{\psi \cdot \kappa} + k_{\psi \cdot \kappa} \cdot \alpha_p \quad (49)$$

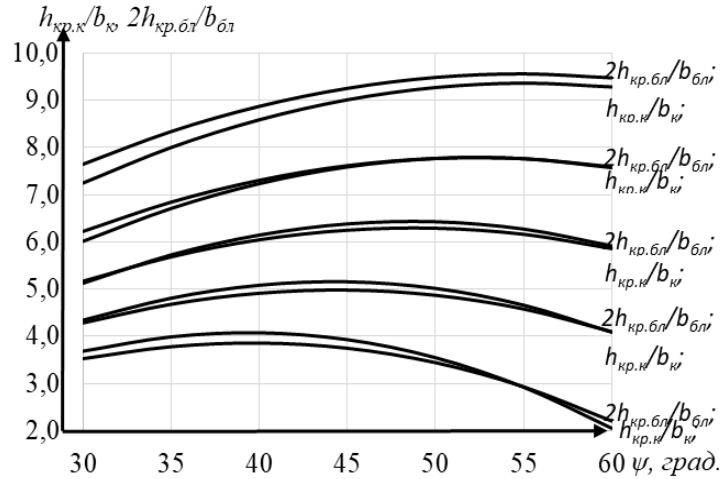


Рис. 9. Залежність відносної критичної глибини комбінованого різання ґрунту $h_{кр,к}/b_{к}$, і двох відносних критичних глибин блокованого різання ґрунту у верхньому ярусі $2h_{кр,бл}/b_{бл}$ від повздовжнього кута зсуву ψ при різних значеннях кута різання α_p , для напівтвердого суглинку при $\gamma = \gamma_{к}$

Значення коефіцієнтів інтерполяції кута повздовжнього зсуву ґрунту наведені в табл. 2. Похибка інтерполяції не перевищує 4,24%.

Таблиця 2

Значення апроксимуючих коефіцієнтів критичної глибини комбінованого різання ґрунту й інтерполюючих коефіцієнтів кута повздовжнього зсуву ґрунту

Тип ґрунту	a_{κ}	n_{κ}	$a_{\kappa, \psi}$	$k_{\kappa, \psi}$
Супісок твердий	6,56	0,65	1,08	-0,349
Суглинок напівтвердий	5,556	0,557	1,046	-0,4
Глина напівтверда	5,085	0,555	1,13	-0,399
Глина тугопластична	4,856	0,572	1,13	-0,399
Суглинок твердий	5,53	0,6	1,06	-0,35

На рис. 9 спостерігаємо однаковий характер кривих залежності відносної глибини сколювання ґрунту від повздовжнього кута зсуву при різних значеннях кута різання для комбінованого і блокованого

різання, також бачимо, що відносна критична глибина при комбінованому різанні ґрунту $h_{кр.к}/b_k$ наближено рівна сумі двох критичних глибин блокованого різання $h_{кр.бл}/b_{бл}$ ($2h_{кр.бл} \approx h_{кр.к}$ і $b_k \approx b_{бл}$).

Залежність відносної глибини сколювання при комбінованому різанні ґрунту від кута різання наведена на рис. 10.

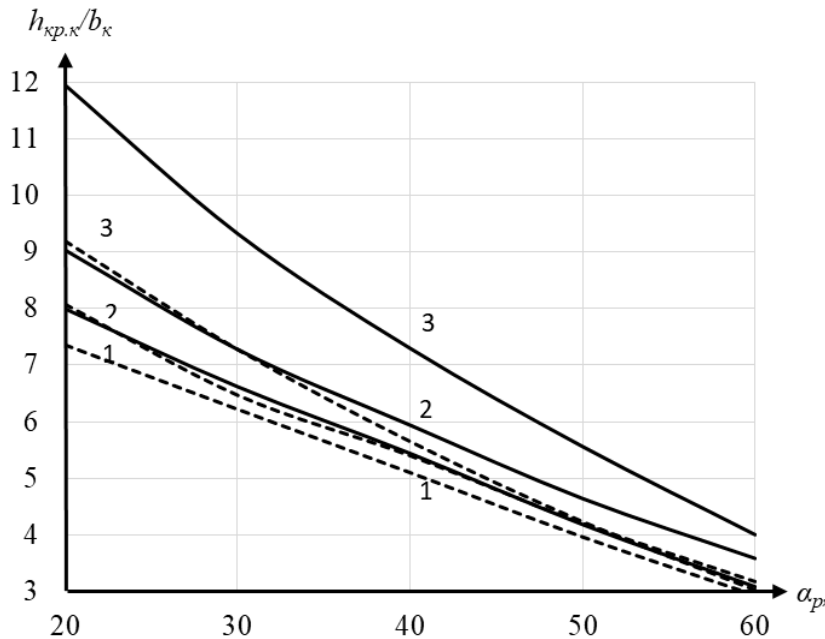


Рис. 10. Залежність відносної глибини сколювання ґрунтів $h_{кр.к}/b_k$ від кута різання ножа α_p при комбінованому руйнуванні ґрунту:

1 – напівтверда глина; 2 – напівтвердий суглинок; 3 – твердий супісок;

----- з урахуванням бічного тиску ($\gamma_k=80^\circ$, $\xi q>0$);

..... – без бічного тиску ($\gamma = \gamma_k$, $\xi q=0$)

Із графіків на рис. 10 бачимо, що при незмінних параметрах ножа при куті різання ($\alpha_p=20^\circ$) відносна глибина сколювання $h_{кр.к}/b_k$ для різних ґрунтів знаходиться в межах від 8 до 11,96; при ($\alpha_p=30^\circ$) $h_{кр.к}/b_k$ – в межах від 6,62 до 9,33; при ($\alpha_p=40^\circ$) $h_{кр.к}/b_k$ – в межах від 5,44 до 7,3; при ($\alpha_p=50^\circ$) $h_{кр.к}/b_k$ – в межах від 4,18 до 5,56; і при ($\alpha_p=60^\circ$) $h_{кр.к}/b_k$ – в межах від 3,08 до 4. За наявності бічного тиску на бокових гранях елемента стружки $\gamma_k=80^\circ$ критична глибина значно зменшується при незмінних параметрах ножа ($\alpha_p=20^\circ$), відносна глибина сколювання з врахуванням бокового тиску при $h_{кр.к}/b_k$ для різних ґрунтів знаходиться в межах від 7,36 до 9,2; при ($\alpha_p=30^\circ$) $h_{кр.к}/b_k$ – в межах від 6,22 до 7,28; при ($\alpha_p=40^\circ$) $h_{кр.к}/b_k$ – в межах від 5,1 до 5,65; при ($\alpha_p=50^\circ$) $h_{кр.к}/b_k$ – в межах від 3,96 до 4,23; і при ($\alpha_p=60^\circ$) $h_{кр.к}/b_k$ – в межах від 2,93 до 3,17.

Математична модель (46) з урахуванням (47) і (48) громіздка і незручна для практичних розрахунків. З метою її спрощення проведена її апроксимація. Як результат, отримано залежність для визначення критичної глибини комбінованого різання ґрунтів

$$\frac{h_{кр.к}}{b_k} = \frac{a_k}{(tg \alpha_p)^{n_k}}, \quad (50)$$

де a_k і n_k – коефіцієнти апроксимації, які залежать від фізико-механічних властивостей ґрунту (табл. 2).

Значення коефіцієнтів апроксимації змінюються для ґрунтів другої та третьої категорій в межах: $a_k = 4,856 \dots 6,56$; $n_k = 0,555 \dots 0,65$.

3. Визначення критичної глибини при асиметричному блокованому та напівблокованому різанні ґрунту

Копання траншей одноківшевыми та багатоківшевыми екскаваторами здійснюється за умов обмеження робочих органів боковими вертикальними стінками. Руйнування ґрунту крайніми боковими різцями (зубами), що встановлені на робочих органах екскаваторів, здійснюється з обмеженням робочого процесу цими вертикальними стінками з однієї сторони різця. З іншої сторони різець взаємодіє з масивом ґрунту, утворюючи проріз з одностороннім розвалом, або не взаємодіє, як при вільному різанні. У першому випадку різець здійснює блоковане асиметричне різання, а в другому – напівблоковане різання.

При $h > h_{кр}$ інтенсивність зростання опору різанню ножа збільшується за рахунок запресовки ґрунту в бічні стінки прорізу, а площа руйнування зменшується внаслідок неможливості впливу на процес руйнування ґрунту денної поверхні. Як результат, енергоємність робочого процесу підвищується, тому розрахунок параметрів одноківшевих і багатоківшевих траншейних екскаваторів необхідно здійснювати на основі критичноглибинного різання ґрунтів.

Середні різці ланцюгово-скребкових траншейних екскаваторів і зуби ковшів одноківшевих екскаваторів працюють за умов симетричного блокованого, напівблокованого, вільного та комбінованого (при двоярусній схемі розробки) різання, а крайні бокові різці – за умов асиметричного блокованого або напівблокованого різання.

Критичні глибини симетричного блокованого, напівблокованого та комбінованого різання визначені в літературі^{28, 29, 30, 31, 32}.

Визначимо критичну глибину асиметричного блокованого різання ґрунту в траншеї біля вертикальної стінки, яка обмежує простір руйнування різця з однієї сторони. З цією метою розроблена розрахункова схема взаємодії прямолінійного різця з ґрунтом (рис. 11). Задача вирішується при відомих припущеннях^{33, 34}.

На елементарний об'єм елемента стружки висотою dh в момент попередній сколюванню ґрунту різцем діють такі сили, приведені у вертикальну площину ОАД (див. рис. 11, а): активна сила $dN' = \frac{dN}{\cos \varphi}$, яка направлена під кутом зовнішнього тертя ґрунту φ до нормалі лобової площини різця; нормальна реакція dN_c і дотичні сили dT_c , $dT_{бок} + \cos \delta$ і $dT_{бок2}$ в площині зсуву ґрунту. Тоді система рівнянь рівноваги всіх сил на нормальну (n) і дотичну (τ) осі до лобової площини сколювання мають такий вигляд (51). З першого рівняння системи (51) отримаємо (52).

²⁸ Кравець С.В., Кирикович В.Д., Блажієвський В.С. Визначення критичної глибини різання при напівблокованому різанні ґрунту. *Вісник Національного університету водного господарства та природокористування*. 2007. Вип. 3 (ч. 2). С. 220–225.

²⁹ Артемьев К.А. Теория резания грунтов землеройно-транспортными машинами. Омск : ОмПИ, 1989. 80 с.

³⁰ Коваль А.Б., Мусійко В.Д., Лейченко Ю.Б. Основи синтезу компонуальної схеми універсальних землерийних машин безперервної дії. *Systemy i srodki transportu samochodowego. Wubrane zagadnienie : Monografia № 4.38 Seria: Transport pod redakcja naukowa Kazemierza Lejdy*. Rzeszów : Politechnika Rzeszowska, 2015. S. 263–268.

³¹ Кравець С.В., Кованько В.В., Лук'янчук О.П. Наукові основи створення землерийно-ярусних машин і підземнорухомих пристроїв : монографія. Рівне : НУВГП, 2015. 322 с.

³² Кравець С.В., Стіньо О.В. Визначення критичної глибини різання при комбінованому поярусному руйнуванні ґрунту. *Строительство. Материаловедение. Машиностроение. «Интенсификация. раб. проц. строит. и дор. машин»*. Вип. 72. 2013. С. 128–137.

³³ Артемьев К.А. Теория резания грунтов землеройно-транспортными машинами. Омск : ОмПИ, 1989. 80 с.

³⁴ Кравець С.В., Кованько В.В., Лук'янчук О.П. Наукові основи створення землерийно-ярусних машин і підземнорухомих пристроїв : монографія. Рівне : НУВГП, 2015. 322 с.

Закон розподілення нормального тиску на ніж по глибині представлено у вигляді (11).

З урахуванням (11) вираз (52) переписеться таким чином

$$dN_c = \frac{\cos(\alpha_p + \varphi + \psi)}{\cos \varphi \sin \alpha_p} b_p \left(q_0 + \frac{q_{кр} - q_0}{h_c} k_{неп} h \right) dh \quad (54)$$

Елементарні дотичні сили, які діють у лобовій (dT_c) і бокових ($dT_{бок1}$, $dT_{бок2}$) площинах сколювання, визначаються за законом Кулона для ґрунтів

$$dT_c = \operatorname{tg} \varphi_0 dN_c + c dF_c \quad (55)$$

$$dT_{бок1} = (\xi q \cos \rho \cos \lambda \operatorname{tg} \varphi_0 + c) dF_{бок1} \quad (56)$$

$$dT_{бок2} = (\xi q \operatorname{tg} \varphi_0 + c) dF_{бок2} \quad (57)$$

де: φ_0 – кут внутрішнього тертя ґрунту; c – коефіцієнт зчеплення ґрунту; ξ – коефіцієнт бокового тиску елемента ґрунтової стружки; dF_c , $dF_{бок1}$, $dF_{бок2}$ – елементарні площі відповідно лобової та бокових площин сколювання; ρ , δ , λ – кути, що утворюються боковою площиною сколювання з паралельною вертикальній боковій стінці траншеї площиною (див. рис. 11, в).

Елементарні площі відповідно дорівнюють:

$$dF_c = (b_p + \rho r_c) \frac{dh}{\sin \psi} = \left[b_p + \rho (\operatorname{ctg} \alpha_p + \operatorname{ctg} \psi) (h_c - h) \right] \frac{dh}{\sin \psi}, \quad (58)$$

$$dF_{бок1} = r_c \frac{dh}{\cos \lambda} = (\operatorname{ctg} \alpha_p + \operatorname{ctg} \psi) (h_c - h) \frac{dh}{\cos \alpha}, \quad (59)$$

$$dF_{бок2} = r_c \cdot dh = (\operatorname{ctg} \alpha_p + \operatorname{ctg} \psi) (h_c - h) dh, \quad (60)$$

де r_c – поточне значення радіуса сколювання ґрунту.

Якщо підставити вирази (55...57) у друге рівняння системи (51) з урахуванням залежностей (54), (58...60) і проінтегрувати його в межах від 0 до h_c , то після проміжних алгебраїчно-тригонометричних перетворень отримаємо рівняння:

$$\begin{aligned} & \frac{\operatorname{ctg} \alpha_p + \operatorname{ctg} \psi}{2} \times \\ & \times \left\{ \left[\frac{c \rho}{\sin \psi} + c \left(1 + \frac{\cos \delta}{\cos \lambda} \right) \right] + \xi \left(q_0 + \frac{q_{кр} - q_0}{3} k_{неп} \right) \cos \rho \cos \delta \cdot \operatorname{tg} \varphi_0 + \xi \operatorname{tg} \varphi_0 \right\} h_c = \quad (61) \\ & = \left[\left(q_0 + \frac{q_{кр} - q_0}{2} k_{неп} \right) \frac{\sin(\alpha_p + \varphi + \varphi_0 + \psi)}{\cos \varphi \cos \varphi_0 \sin \alpha_p} - \frac{c}{\sin \psi} \right] b_p \end{aligned}$$

Звідки

$$h_{кр} = \frac{h_c}{k_{неп}} = \frac{\left(q_0 + \frac{q_{кр} - q_0}{2} k_{неп} \right) \frac{\sin(\alpha_p + \varphi + \varphi_0 + \psi)}{\cos \varphi \cos \varphi_0 \sin \alpha_p} - \frac{c}{\sin \psi}}{\frac{\operatorname{ctg} \alpha_p + \operatorname{ctg} \psi}{2} k_{неп} \left[c \left(1 + \frac{\rho}{\sin \psi} + \frac{\cos \delta}{\cos \lambda} \right) + \right.} \quad (62)$$

$$\left. + \xi \left(q_0 + \frac{q_{кр} - q_0}{3} k_{неп} \right) \operatorname{tg} \varphi_0 (1 + \cos \rho \cos \delta) \right]}$$

Кути ρ , δ , λ визначаються із геометричних співвідношень (див. рис. 11, в) за (19, 20, 21).

Кут нахилу бокової площини елемента стружки до горизонту γ визначається за залежністю (66)^{35, 36}.

$$\gamma = \arccos \left[\frac{c \cdot \cos \varphi_0}{\left(1 - 0,74 \operatorname{tg} \varphi_0 - \frac{1,52 \cdot c}{q_{кр}} \right) q_{сер}} \right] - \varphi_0 \quad (66)$$

$$q_{сер} = \frac{q_0 + q_{кр}}{2} \quad (67)$$

Математична модель (62) може бути використана для визначення критичної глибини різання при поярусній розробці ґрунту. Умови руйнування ґрунту у верхньому та наступних нижніх ярусах неідентичні. Верхній ґрунторозробний орган (різець) внаслідок впливу денної поверхні працює за умов асиметричного блокованого різання: з однієї сторони різець обмежений вертикальною боковою стінкою траншеї, з іншої – масивом ґрунту, що руйнується і виходить на денну поверхню. Як результат, утворюється проріз із одностороннім боковим розвалом зі сторони денної поверхні ($\rho > 0$), а з іншої сторони – з вертикальною стінкою ($\rho = 0$) (див. рис. 11). Зі сторони бокового розвалу ґрунт руйнується переважно за рахунок деформації відриву, а тому на боковій площині елемента стружки з

³⁵ Критичноглибинні двоярусні ґрунторозпушувачі : монографія / С.В. Кравець, М.П. Скоблюк, О.В. Стіньо, Р.В. Зоря ; за заг. ред. С.В. Кравця. Рівне : НУВГП, 2018. 235 с.

³⁶ Мусійко В.Д. Фізико-математичне моделювання робочих процесів землерийних машин безперервної дії: *Вісник НТУ*. 2015. Вип. 1 (31). С. 385–394.

розвалом відсутні бічний тиск і сили тертя ($\xi q=0$)³⁷. Зі сторони вертикальної стінки ґрунт руйнується за рахунок деформації зрізу та зсуву, а тому на бічній вертикальній площині елемента стружки виникають нормальний тиск ($\xi q > 0$) і сили тертя ($\xi q \operatorname{tg} \varphi_0 > 0$). Верхній різець створює вільний простір із розміром b_p денної поверхні для виходу ґрунту із нижнього ярусу. Внаслідок цього нижні ґрунторозробні органи формують прямокутну щілину ($\rho=0$). Формування прорізу в нижньому ярусі здійснюється також за рахунок деформацій зрізу та зсуву ($\xi q > 0$; $\xi q \operatorname{tg} \varphi_0 > 0$).

З урахуванням цих особливостей залежність (62) для визначення критичних глибин асиметричного блокованого різання у верхньому і наступних нижніх ярусах переписується таким чином

$$h_{kp1} = \frac{\left(q_0 + \frac{q_{kp} - q_0}{2} k_{nep} \right) \frac{\sin(\alpha_p + \varphi + \varphi_0 + \psi)}{\cos \varphi \cos \varphi_0 \sin \alpha_p} - \frac{c}{\sin \psi}}{\frac{\operatorname{ctg} \alpha_p + \operatorname{ctg} \psi}{2} k_{nep} \left[c \left(1 + \frac{\rho}{\sin \psi} + \frac{\cos \delta}{\cos \lambda} \right) + \right.} b_p \quad (68)$$

$$\left. + \xi \left(q_0 + \frac{q_{kp} - q_0}{3} k_{nep} \right) \operatorname{tg} \varphi_0 \right]}$$

$$h_{kp2} = \frac{\left(q_0 + \frac{q_{kp} - q_0}{2} k_{nep} \right) \frac{\sin(\alpha_p + \varphi + \varphi_0 + \psi)}{\cos \varphi \cos \varphi_0 \sin \alpha_p} - \frac{c}{\sin \psi}}{(\operatorname{ctg} \alpha_p + \operatorname{ctg} \psi) k_{nep} \left[c + \xi \left(q_0 + \frac{q_{kp} - q_0}{3} k_{nep} \right) \operatorname{tg} \varphi_0 \right]} b_p \quad (69)$$

Залежність (69) ідентична залежності для визначення критичної глибини різання в нижніх ярусах, наведеної в літературі^{38, 39}. Це підтверджує достовірність математичної моделі (62).

³⁷ Станевский В.П. Совершенствование рабочего процесса землеройных машин. Київ : Вища школа, Изд-во при КГУ, 1984. 128 с.

³⁸ Артемьев К.А. Теория резания грунтов землеройно-транспортными машинами. Омск : ОмПИ, 1989. 80 с.

³⁹ Кравець С.В., Кованько В.В., Лук'янчук О.П. Наукові основи створення землерійно-ярусних машин і підземнорухомих пристроїв : монографія. Рівне : НУВГП, 2015. 322 с.

Якщо крайні бокові різці здійснюють напівблоковане різання (блокування однієї бокової грані різця вертикальною стінкою), $dT_{бок1}=0$.

$$h_{кр1нбл.} = \frac{\left(q_0 + \frac{q_{кр} - q_0}{2} k_{нер} \right) \frac{\sin(\alpha_p + \varphi + \varphi_0 + \psi)}{\cos \varphi \cos \varphi_0 \sin \alpha_p} - \frac{c}{\sin \psi}}{\frac{\operatorname{ctg} \alpha_p + \operatorname{ctg} \psi}{2} k_{нер} \left[c + \xi \left(q_0 + \frac{q_{кр} - q_0}{3} k_{нер} \right) \operatorname{tg} \varphi_0 \right]} b_p \quad (70)$$

Порівнявши залежності (69) і (70), можна зробити висновок, що критична глибина напівблокованого різання крайніми боковими різцями у верхньому ярусі в 2 рази більша за критичну глибину блокованого різання у нижньому ярусі, якщо $\gamma = \pi/2$.

У залежностях (68), (69) і (70) невідомим є параметр ψ . Він визначається на основі припущення, що кожний раз для $h_p \geq h_{кр}$ значення кута сколювання ψ встановлюється таким, що опір різанню ножа буде мінімальним [17; 19]. Мінімальний опір різанню (при заданій глибині різання $h_p \geq h_{кр}$) ножа можливий при мінімальній площі епюри нормального тиску, а це буде, якщо $h_{кр} = h_c/k_{нер} = \max$ і $h_c = \max$. Таким чином, кут зсуву ґрунту визначається максимальним значенням глибини сколювання^{40, 41, 42, 43, 44, 45}.

⁴⁰ Артемьев К.А. Теория резания грунтов землеройно-транспортными машинами. Омск : ОмПИ, 1989. 80 с.

⁴¹ Коваль А.Б., Мусійко В.Д., Лейченко Ю.Б. Основи синтезу компоновальної схеми універсальних землерийних машин безперервної дії. *Systemy i srodki transportu samochodowego. Wubrane zagadnienie : monografia № 4.38* Seria: Transport pod redakcja naukowa Kazemierza Lejdy. Rzeszów : Politechnika Rzeszowska, 2015. S. 263–268.

⁴² Кравець С.В., Кованько В.В., Лук'янчук О.П. Наукові основи створення землерийно-ярусних машин і підземнорухомих пристроїв : монографія. Рівне : НУВГП, 2015. 322 с.

⁴³ Критичноглибинні двоярусні ґрунторозпушувачі : монографія / С.В. Кравець, М.П. Скоблюк, О.В. Стіньо, Р.В. Зоря ; за заг. ред. С.В. Кравця. Рівне : НУВГП, 2018. 235 с.

⁴⁴ Завьялов А.М., Завьялов М.А., Кузнецова В.Н., Мещеряков В.А. Математическое моделирование рабочих процессов дорожных и строительных машин: имитационные и адаптивные модели : монографія. Омск : СибАДИ, 2012. 411 с.

⁴⁵ Мусійко В.Д. Масштабні ефекти при фізичному моделюванні процесів різання ґрунтів. *Вісник Національного університету водного господарства та природокористування. Технічні науки*. 2015. Вип. 2 (70). С. 112–119.

Залежності відносної критичної глибини різання у верхньому ярусі від кута зсуву ґрунтів наведені на рис. 12, 13, а від кута різання різця – на рис. 14.

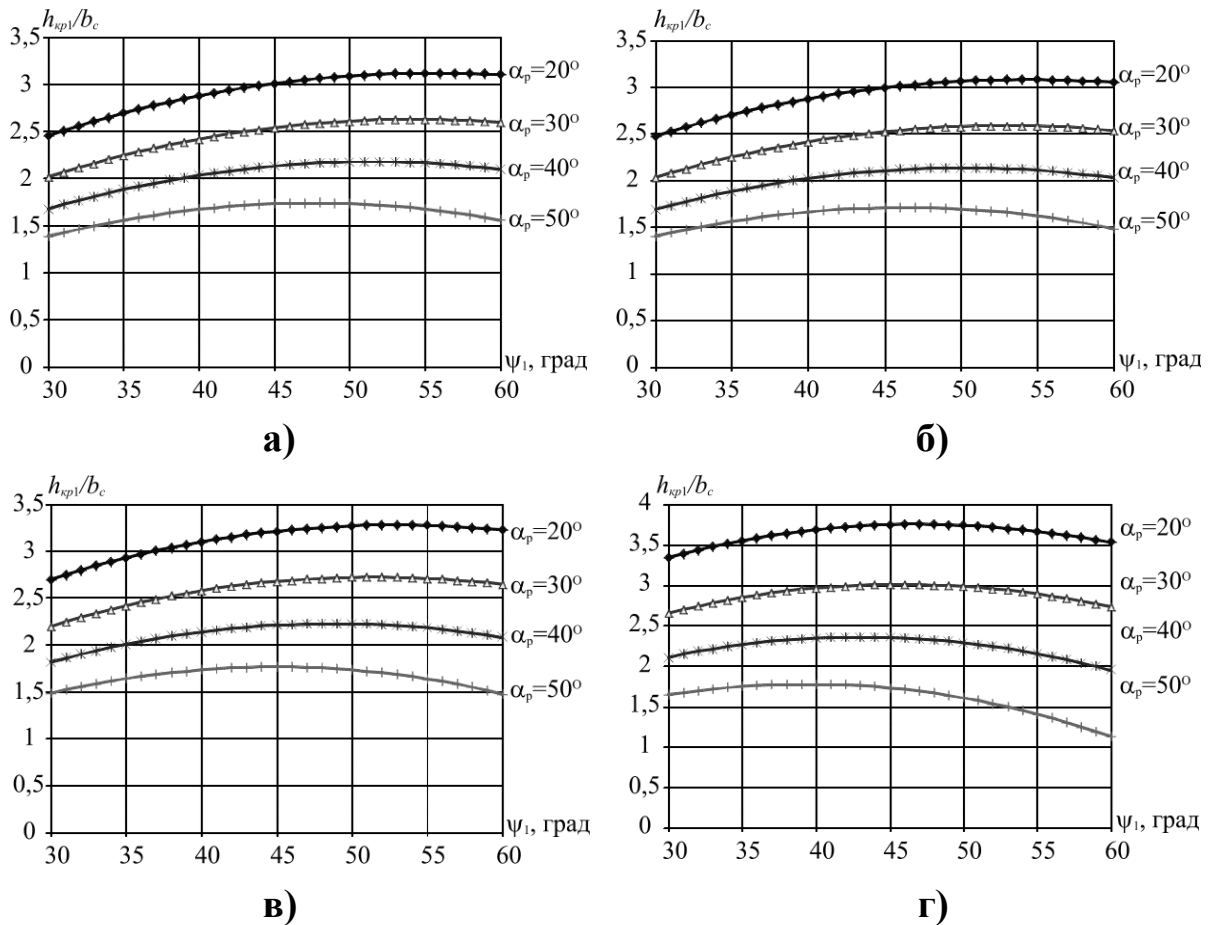


Рис. 12. Залежність відносної критичної глибини асиметричного блокованого різання боковими різцями від кута зсуву ґрунтів:

*а) – тугопластична глина; б) – напівтверда глина;
в) – напівтвердий суглинок; г) – твердий супісок*

Розрахункові залежності показують, що при зменшенні кута різання різця від 50° до 20° відносна критична глибина асиметричного блокованого різання ($h_{кр1}/b_p$) збільшується: для тугопластичної та напівтвердої глини від 1,71 до 3,12; для напівтвердого суглинку – від 1,76 до 3,27; для твердого супіску – від 1,78 до 3,75.

Для напівблокованого різання ця глибина збільшується: для тугопластичної глини – від 2,92 до 5,21; для напівтвердої глини – від 2,78 до 5,03; для напівтвердого суглинку – від 2,77 до 5,14; для твердого супіску – від 2,65 до 5,45. Математичні моделі (68) і (70) є громіздкими та незручними для вираховування критичної глибини різання. З метою її спрощення проведена апроксимація в межах кута

різання різця $\alpha_p=20\dots50^\circ$. Помилка апроксимації не перевищує 3,4%. Як результат, отримана лінійна спадна залежність

$$\frac{h_{кр1}}{b'_p} = a' - n' \cdot \alpha_p, \quad (71)$$

де a' та n' – коефіцієнти апроксимації, що залежать від типу ґрунту та різання; α_p – кут різання різця у градусах.

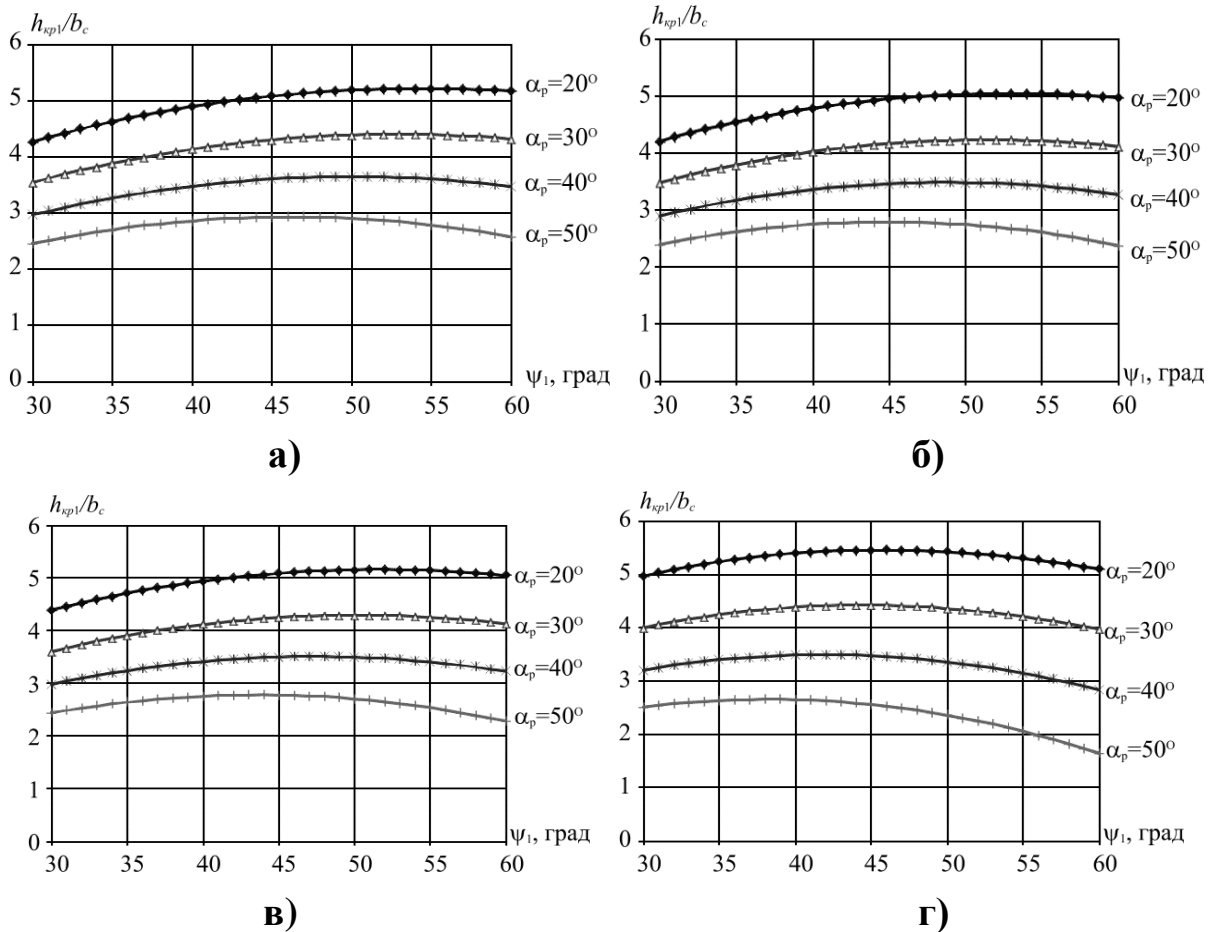


Рис. 13. Залежність відносної критичної глибини напівблокованого різання боковими різцями від кута зсуву:
 а) – тугопластична глина; б) – напівтверда глина; в) – напівтвердий суглинок; г) – твердий супісок

Значення коефіцієнтів апроксимації для бокових різців наведені у табл. 3.

Отримані математичні моделі (68), (70) і (71) дозволяють у кожному конкретному випадку на основі вихідних даних про талі ґрунти, що рекомендують БНіП, залежно від кута різання різця в межах кута різання $20^\circ\dots50^\circ$ визначити критичну глибину різання

для крайніх бокових різців багатоскребкових ланцюгових траншейних екскаваторів.

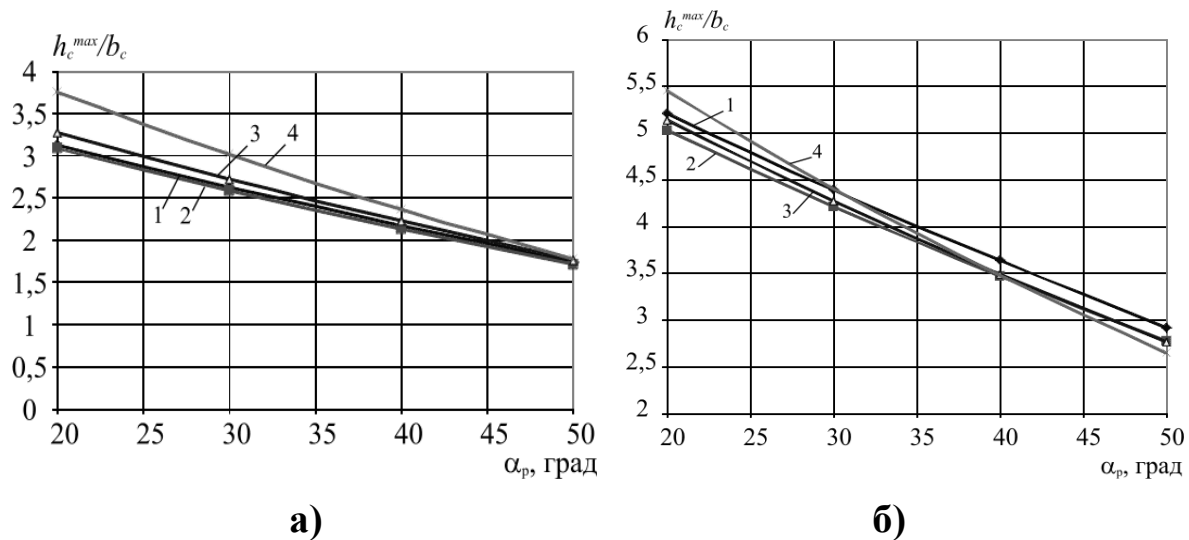


Рис. 14. Залежності відносної критичної глибини різання ґрунтів від кута різання бокових різців:

а) – для асиметричного блокованого різання; б) – для напівблокованого різання; 1 – тугопластична глина; 2 – напівтверда глина; 3 – напівтвердий суглинок; 4 – твердий супісок

Таблиця 3

Значення коефіцієнтів апроксимації для бокових різців

Тип різання \ Тип ґрунту	Асиметричне блоковане		Асиметричне напівблоковане	
	a'	n'	a'	n'
Тугопластична глина	4,02	0,046	6,70	0,076
Напівтверда глина	3,98	0,046	6,50	0,075
Напівтвердий суглинок	4,26	0,050	6,69	0,079
Твердий супісок	5,02	0,066	7,26	0,093

Отримані математичні моделі для визначення критичної глибини різання для крайніх бокових різців багатоскребкових ланцюгових траншейних екскаваторів, що працюють за умов асиметричного бокового різання та напівблокованого різання.

Критична глибина напівблокованого різання крайніми боковим різцями у верхньому ярусі у 2 рази більша за критичну глибину різання асиметричного блокованого різання у нижньому ярусі, якщо $\gamma = \pi/2$.

Розрахункові значення відносної критичної глибини асиметричного блокованого та напівблокованого різання для крайніх бокових різців змінюється відповідно в межах (при зміні кута різання $\alpha_p = 50^\circ \dots 20^\circ$): для тугопластичної глини $h_{кр1}/b_p = 1,74 \dots 3,12$; $2,92 \dots 5,21$; для напівтвердого суглинку $h_{кр1}/b_p = 1,76 \dots 3,27$; $2,77 \dots 5,14$; для твердого супіску $h_{кр1}/b_p = 1,78 \dots 3,75$; $2,65 \dots 5,45$; для напівтвердої глини $h_{кр1}/b_p = 1,71 \dots 3,08$; $2,78 \dots 5,03$.

ВИСНОВКИ

Проведені дослідження визначення критичної глибини різання відкривають перспективу максимального збільшення питомої продуктивності машин для глибокого різання ґрунту через оптимізацію конструкції робочого органа та схеми руйнування ґрунтового середовища.

Критична глибина для напівблокованого різання у 2 рази більша за критичну глибину блокованого різання ґрунтів. Відносна критична глибина при комбінованому різанні ґрунту $h_{кр.к}/b_k$ наближено рівна сумі двох критичних глибин блокованого різання $h_{кр.бл}/b_{бл}$ ($2h_{кр.бл} \approx h_{кр.к}$ і $b_k \approx b_{бл}$). Критична глибина напівблокованого різання крайніми боковим різцями у верхньому ярусі у 2 рази більша за критичну глибину різання асиметричного блокованого різання у нижньому ярусі, якщо $\gamma = \pi/2$.

При незмінних параметрах ножа при куті різання ($\alpha_p = 20^\circ$) відносна глибина сколювання $h_{кр.к}/b_k$ для різних ґрунтів знаходиться в межах від 8 до 11,96; при ($\alpha_p = 30^\circ$) $h_{кр.к}/b_k$ – в межах від 6,62 до 9,33; при ($\alpha_p = 40^\circ$) $h_{кр.к}/b_k$ – в межах від 5,44 до 7,3; при ($\alpha_p = 50^\circ$) $h_{кр.к}/b_k$ – в межах від 4,18 до 5,56; і при ($\alpha_p = 60^\circ$) $h_{кр.к}/b_k$ – в межах від 3,08 до 4. За наявності бічного тиску на бокових гранях елемента стружки $\gamma_k = 80^\circ$ критична глибина значно зменшується при незмінних параметрах ножа ($\alpha_p = 20^\circ$) відносна глибина сколювання з врахуванням бокового тиску при $h_{кр.к}/b_k$ для різних ґрунтів знаходиться в межах від 7,36 до 9,2; при ($\alpha_p = 30^\circ$) $h_{кр.к}/b_k$ – в межах від 6,22 до 7,28; при ($\alpha_p = 40^\circ$) $h_{кр.к}/b_k$ – в межах від 5,1 до 5,65; при ($\alpha_p = 50^\circ$) $h_{кр.к}/b_k$ – в межах від 3,96 до 4,23; і при ($\alpha_p = 60^\circ$) $h_{кр.к}/b_k$ – в межах від 2,93 до 3,17.

Розрахункові значення відносної критичної глибини асиметричного блокованого та напівблокованого різання для крайніх бокових різців змінюється відповідно в межах (при зміні кута різання $\alpha_p = 50^\circ \dots 20^\circ$): для тугопластичної глини $h_{кр1}/b_p = 1,74 \dots 3,12$; $2,92 \dots 5,21$; для напівтвердого суглинку $h_{кр1}/b_p = 1,76 \dots 3,27$;

2,77...5,14; для твердого супіску $h_{кр1}/b_p = 1,78...3,75$; 2,65...5,45; для напівтвердої глини $h_{кр1}/b_p = 1,71...3,08$; 2,78...5,03.

АНОТАЦІЯ

Визначальними умовами для створення ґрунтозахисних та енергозберігаючих багатоярусних робочих органів є їх взаємодія з ґрунтом як середовищем експлуатації землерийно-ярусних машин. Відомо, що процес механічної розробки талих ґрунтів супроводжується просторовою взаємодією робочого інструмента із середовищем і найбільш характерним поелементним відокремленням ґрунтової стружки за рахунок деформацій зсуву і відриву у верхньому ярусі тіа тільки за рахунок деформацій зрізу і зсуву в нижніх ярусах. Для усунення закритичної зони ущільнення ґрунту і зниження енергоємності робочого процесу формування щілини повинно здійснюватися багатоярусними робочими органами, в яких висота ярусів не перевищує критичної глибини різання. Проведені дослідження визначення критичної глибини різання відкривають перспективу максимального збільшення питомої продуктивності машин для глибокого різання ґрунту через оптимізацію конструкції робочого органа та схеми руйнування ґрунтового середовища.

ЛІТЕРАТУРА

1. Ветров Ю.А. Резание ґрунтов землеройными машинами. Москва : Машиностроение, 1972. 359 с.
2. Кравец С.В., Романовский А.Л. Перспективные направления в области создания бестраншейных дренажников. *Повышение эффективности использования мелиоративных земель* : тез. докл. респ. научн.-техн. конф. (Ровно, ноябрь 1984). Ровно, 1984. Ч. III. С. 81.
3. Кравец С.В., Ткачук В.Ф., Романовский А.Л., Нечидюк А.А. Основные принципы конструирования рабочих органов для глубокой разработки талих ґрунтов. *Механизация и автоматизация земляных работ* : Сб. докл. XIV Межд. научн.-техн. конф. (Киев, 24–27 сентября 1991 г.). Киев, 1991. С. 260–262.
4. Ткачук В.Ф., Кравец С.В., Кравец Л.Б. Определение критической глубины резания ґрунта ножом. *Горн., строит., дор. и мелиорат. машины*. 1987. Вып. 40. С. 22–28.
5. Rathje I. Der Schnittvorgang im Sande. *Forschungsarbeiten auf dem Gebiete des Ingenieurwesens*, 1931, Н. 350.
6. Godwin R.I., Spoor G.J. Soil failure with narrow tines. *Agric Eng Res* 22, 1977. P. 213–228.

7. Станевский В.П. Совершенствование рабочего процесса землеройных машин. Киев : Вища школа. Изд-во при КГУ, 1984. 128 с.
8. Томин В.Д. Бестраншейное строительство закрытого дренажа. Москва : Колос, 1981. 240 с.
9. Зеленин А.Н., Баловнев В.И., Керов И.П. Машины для земляных работ. Москва : Машиностроение, 1975. 424 с.
10. Полтавцев И.С., Орлов В.Б., Ляхович И.Ф. Специальные землеройные машины и механизмы для городского строительства. Киев : Будівельник, 1977. 136 с.
11. Уродов В.И. Физические основы глубокого резания грунтов. Минск : Наука и техника, 1972. 232 с.
12. Алексеева Т.В., Артемьев К.А., Бромберг А.А. и др. Машины для земляных работ. *Дорожные машины*. Москва : Машиностроение, 1972. Ч. 1. 504 с.
13. Маслов Н.Н. Основы инженерной геологии и механики грунтов. Москва : Высшая школа, 1976. 511 с.
14. Машины для земляных работ : учебник / Гаркави Н.Г., Аринченков В.И., Карпов В.В. и др. ; общ. ред. Н.Г. Гаркави. Москва : Высшая школа, 1982. 335 с.
15. Кравець С.В. Грунтозахисні та енергозберігаючі машини для прокладки підземних комунікацій. (Основи теорії, проектування та створення) : навчальний посібник. Рівне : Вид-во РДТУ, 1999. 278 с.
16. Кравець С.В., Кирикович В.Д., Блажієвський В.С. Визначення критичної глибини різання при напівблокованому різанні ґрунту. *Вісник Національного університету водного господарства та природокористування*. 2007. Вип. 3 (ч. 2). С. 220–225.
17. Артемьев К.А. Теория резания грунтов землеройно-транспортными машинами. Омск : ОмПИ, 1989. 80 с.
18. Коваль А.Б., Мусійко В.Д., Лейченко Ю.Б. Основы синтеза компоновальной схемы универсальных землерейных машин безперервної дії. *Systemy i srodki transportu samochodowego. Wubrane zagadnienie: Monografia № 4.38 Seria: Transport pod redakcja naukowa Kazemierza Lejdy*. Rzeszów : Politechnika Rzeszowska, 2015. S. 263–268.
19. Кравець С.В., Кованько В.В., Лук'янчук О.П. Наукові основи створення землерейно-ярусних машин і підземнорухомих пристроїв : монографія. Рівне : НУВГП, 2015. 322 с.
20. Кравець С.В., Стіньо О.В. Визначення критичної глибини різання при комбінованому поярусному руйнуванні ґрунту. *Строительство. Материаловедение. Машиностроение. «Интен-*

сификация. раб. проц. строит. и дор. машин». Вып. 72. 2013. С. 128–137.

21. Критичноглибинні двоярусні ґрунторозпушувачі : монографія / С.В. Кравець, М.П. Скоблюк, О.В. Стіньо, Р.В. Зоря ; за заг. ред. С.В. Кравця. Рівне : НУВГП, 2018. 235 с.

22. Завьялов А.М., Завьялов М.А., Кузнецова В.Н., Мещеряков В.А. Математическое моделирование рабочих процессов дорожных и строительных машин: имитационные и адаптивные модели : монография. Омск : СибАДИ, 2012. 411 с.

23. Мусійко В.Д. Масштабні ефекти при фізичному моделюванні процесів різання ґрунтів. *Вісник Національного університету водного господарства та природокористування. Технічні науки*. 2015. Вип. 2 (70). С. 112–119.

24. Мусійко В.Д. Фізико-математичне моделювання робочих процесів землерийних машин безперервної дії: *Вісник НТУ*. 2015. Вип. 1 (31). С. 385–394.

Information about the authors:

Kravets Svyatoslav Vladimirovich,

Doctor of Technical Sciences, Professor,

Head of the Department of Building, Road, Melioration, Agricultural
Machinery and Equipment

National University of Water and Environmental Engineering

11, Soborna str., Rivne, 33028, Ukraine

Lukianchuk Olexander Petrovich,

Ph.D.,

Associate Professor at the Department of Building, Road, Melioration,
Agricultural Machinery and Equipment

National University of Water and Environmental Engineering

11, Soborna str., Rivne, 33028, Ukraine

Nechydyuk Anatoliy Anatoliyovych,

Ph.D.,

Associate Professor at the Department of Building, Road, Melioration,
Agricultural Machinery and Equipment

National University of Water and Environmental Engineering

11, Soborna str., Rivne, 33028, Ukraine