

УДК 631.316.22

## ВПЛИВ ШВИДКОСТІ НА КРИТИЧНУ ГЛИБИНУ КОМБІНОВАНОГО РІЗАННЯ ҐРУНТІВ

КРАВЕЦЬ С. В.<sup>1</sup>, *д.т.н., проф.*,  
КОСЯК О. В.<sup>2</sup>, *к.т.н., ст. викл.*,  
ЗОРЯ Р. В.<sup>3</sup>, *асистент.*

<sup>1</sup> Кафедра будівельних, дорожніх, меліоративних, сільськогосподарських машин і обладнання, Національний університет водного господарства та природокористування, вул. Новака, 77, 33028, Рівне, Україна, тел. +38(0362) 63-55-80, моб. тел. +380972891589, e-mail: sv.-kravec@mail.ru, ORCID ID 0000-0003-4063-1942

<sup>2</sup> Кафедра будівельних, дорожніх, меліоративних, сільськогосподарських машин і обладнання, Національний університет водного господарства та природокористування, вул. Новака, 77, 33028, Рівне, Україна, тел. +38(0362) 63-55-80, моб. тел. +380673602359, e-mail: sasha2707@inbox.ru, ORCID ID: 0000-0003-0653-3994

<sup>3</sup> Кафедра будівельних, дорожніх, меліоративних, сільськогосподарських машин і обладнання, Національний університет водного господарства та природокористування, вул. Новака, 77, 33028, Рівне, Україна, тел. +38(0362) 63-55-80, моб. тел. +380972933531; e-mail: romkazorka@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-3024-7173

**Анотація.** *Ціль.* Метою є математичне моделювання процесів різання та розпушення ґрунту для отримання аналітичної залежності визначення критичної глибини розпушення з урахуванням швидкості робочого органу при комбінованому поярусному руйнуванні ґрунту. *Методика.* Математичне моделювання процесів різання та розпушення ґрунту. *Результати.* У відповідності зі схемою взаємодії робочого органу з ґрунтом (після проектування всіх сил на горизонтальну вісь) визначена критична глибина комбінованого різання ґрунту з урахуванням робочої швидкості та того, що ширина різання ґрунту змінюється зі зміною глибини розпушення і кута різання робочого органу. Побудовано графіки залежності між відносною критичною глибиною, робочою швидкістю робочого органу та кутом різання ґрунту. *Наукова новизна.* Наукова новизна полягає в отриманні вперше аналітичних залежностей для визначення критичної глибини комбінованого різання ґрунту з урахуванням робочої швидкості. *Практична цінність.* Визначено значення критичної глибини розпушення для п'яти типів ґрунту та повного діапазону робочих швидкостей, що залежить від фізико-механічних властивостей ґрунту.

*Ключові слова:* кут різання, глибина розпушення, робоча швидкість, критична глибина, вільне різання, блоковане різання, комбіноване різання

## ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ НА КРИТИЧЕСКУЮ ГЛУБИНУ КОМБИНИРОВАННОГО РЕЗАНИЯ ҐРУНТОВ

КРАВЕЦ С. В.<sup>1</sup>, *д.т.н., проф.*,  
КОСЯК О. В.<sup>2</sup>, *к.т.н., ст. препод.*,  
ЗОРЯ Р. В.<sup>3</sup>, *асистент.*

<sup>1</sup> Кафедра строительных, дорожных, мелиоративных, сельскохозяйственных машин и оборудования, Национальный университет водного хозяйства и природопользования, ул. Новака, 77, 33028, Рівне, Україна, тел. +38(0362) 63-55-80, моб. тел. +380972891589, e-mail: sv.-kravec@mail.ru, ORCID ID 0000-0003-4063-1942

<sup>2</sup> Кафедра строительных, дорожных, мелиоративных, сельскохозяйственных машин и оборудования, Национальный университет водного хозяйства и природопользования, ул. Новака, 77, 33028, Рівне, Україна, тел. +38(0362) 63-55-80, моб. тел. +380673602359, e-mail: sasha2707@inbox.ru, ORCID ID: 0000-0003-0653-3994

<sup>3</sup> Кафедра строительных, дорожных, мелиоративных, сельскохозяйственных машин и оборудования, Национальный университет водного хозяйства и природопользования, ул. Новака, 77, 33028, Рівне, Україна, тел. +38(0362) 63-55-80, моб. тел. +380972933531; e-mail: romkazorka@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-3024-7173

**Аннотация.** *Цель.* Целью является математическое моделирование процессов резания и разрыхления почвы для получения аналитической зависимости определения критической глубины разрыхления с учетом скорости рабочего органа при комбинированном поярусном разрушении почвы. *Методика.* Математическое моделирование процессов резания и разрыхления почвы. *Результаты.* В соответствии со схемой взаимодействия рабочего органа с почвой (после проектирования всех сил на горизонтальную ось) определена критическая глубина комбинированной резки почвы с учетом рабочей скорости и того, что ширина резки почвы меняется с изменением глубины разрыхления и угла резания рабочего органа. Построены графики зависимости между относительной критической глубиной, рабочей скоростью рабочего органа и углом резки почвы. *Научная новизна.* Научная новизна заключается в получении впервые аналитических зависимостей для определения критической глубины комбинированной резки почвы с учетом рабочей скорости. *Практическая ценность.*

Определены значения критической глубины разрыхления для пяти типов грунта и полного диапазона рабочих скоростей, зависит от физико-механических свойств грунта.

*Ключевые слова:* угол резания, глубина рыхления, рабочая скорость, критическая глубина, свободное резки, блокированное резание, комбинированное резание

## INFLUENCE OF THE SPEED ON CRITICAL DEPTH OF COMBINED CUTTING SOIL

KRAVETS S. V.<sup>1</sup>, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,  
KOSIAK O. V.<sup>2</sup>, *Ph. D.*,  
ZORIA R. V.<sup>3</sup>, *ass.*

<sup>1</sup> Department of building, road, reclamation, agricultural machinery and equipment, National University Of Water And Environmental Engineering, O. Novak st, 77, 33028, Rivne, Ukraine, Telephone: +38(0362) 63-55-80, mob. phone: +380972891589, e-mail: sv.kravec@mail.ru, ORCID ID 0000-0003-4063-1942

<sup>2</sup> Department of building, road, reclamation, agricultural machinery and equipment, National University Of Water And Environmental Engineering, O. Novak st, 77, 33028, Rivne, Ukraine. Telephone: +38(0362) 63-55-80, mob. phone: +380673602359, e-mail: sasha2707@inbox.ru, ORCID ID: 0000-0003-0653-3994

<sup>3</sup> Department of building, road, reclamation, agricultural machinery and equipment, National University Of Water And Environmental Engineering, O. Novak st, 77, 33028, Rivne, Ukraine. Telephone: +38(0362) 63-55-80, mob. phone: +380972933531; e-mail: romkazorka@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-3024-7173

**Summary. Purpose.** The object is mathematical modeling of cutting and loosening soil for analysis depending on the critical depth loosening considering the speed of the working body of the combined cutting of the soil. **Methodology.** Mathematical modeling of cutting and loosening the soil. **Results.** In accordance with the scheme of interaction with soil working body (following the design of all forces on the horizontal axis) defined critical depth of combined cutting Soil considering working speed and that the cutting width varies with soil loosening depth and angle cutting working body. Built graph of the relative critical depth with working speed of the working body and angle cutting soil. **Originality.** Scientific innovation is to obtain analytical relations for the first time to determine the critical depth of combined cutting soil taking into account the working speed. **Practical value.** determined the value of the critical depth loosening for five types of the soil and full range of operating speeds, depending on the physical and mechanical properties of soil.

*Keywords:* angle cutting, depth loosening, operating speed, critical depth, free cutting, blocked cutting, combined cutting

Для усунення закритичної зони ущільнення ґрунту і зниження енергоємності робочого процесу необхідно знати величину критичної глибини різання в залежності від умов різання (верхній нижній ярус) і вихідних даних для ґрунтів та швидкості землерийного робочого органу. Процес поєднаного комбінованого різання ґрунту та математична модель для визначення критичної глибини розпушення було розглянуто та описано у попередніх дослідженнях [4, 5, 6, 7, 8].

Для дослідження критичної глибини комбінованого різання з урахуванням швидкості розглянемо процес руйнування ґрунту сколом на основі схеми (рис. 1), при цьому в якості вихідних умов приймаємо наступні припущення:

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

2) елемент стружки розглядається як тверде тіло у вигляді двох трикутних призм з двома симетричними конічними секторами по боках;

3) закон розподілу нормального тиску на лобову площу ножа в зоні сколювання ґрунту прийнятий лінійним по глибині;

4) критична глибина - постійна, незалежно від того, чи працює землерийний робочий орган в режимі заглиблення, або в сталому режимі.

Закон розподілу нормального тиску на лобову поверхню ножа при комбінованому різанні обґрунтований на основі теорії різання ґрунтів Ветрова Ю. В. [2, 3]

При різанні ґрунту енергія витрачається на деформацію і руйнування зсувом шару, що відділяється, а також на подолання сил інерції відокремлених частин. Ці два процеси протікають взаємопов'язано один з одним. Виходячи з цього, силу різання при швидкості  $v$  можна показати як результуючу двох складових [1]:

$$P_V = P + P_{кин}, \quad (1)$$

де  $P$  - сила, необхідна для утворення стружки;  $P_{кин}$  - додаткова сила для надання руху відділеним частинкам ґрунту.

Результатом впливу ножа на шар ґрунту, що відділяється, є деформації. У різних точках масиву ґрунту і у різних напрямках деформації та швидкості їх протікання мають неоднакову величину. Найбільшу швидкість мають пластичні деформації

безпосередньо у напрямку деформування. В цьому випадку ніж переміщує найближчі частинки ґрунту відносно нерухомих у масиві зі швидкістю деформування.

За рис.1, швидкість деформування у напрямку, що складає кут  $\psi$  до напрямку різання, дорівнює [3,9]:

$$v_{\delta} = v \frac{\sin \alpha_p}{\sin(\alpha_p + \psi)}, \quad (2)$$

де  $v$ ,  $\alpha_p$ ,  $\psi$  - відповідно швидкість, кут різання та кут сколювання ґрунту.

Руйнування ґрунту при зсуві проходить в місці виникнення граничних дотичних напружень, тому швидкість руйнування  $v_p$  рівна максимальному значенню динамічної швидкості [12]:

$$v_p = \sqrt{\tau_0 / \gamma_{об}}, \quad (3)$$

де  $\tau_0$  - критична дотична напруга при швидкості різання, близькій до нуля;  $\gamma_{об}$  - об'ємна маса ґрунту.

На основі принципу незалежності дій сил напружений стан ґрунтів при різанні можна характеризувати виразом [12]:

$$\tau_n = \tau_0 + \Delta\tau, \quad (4)$$

де  $\tau_n$  - граничний опір ґрунту зсуву;  $\Delta\tau$  - приріст дотичної напруги при збільшенні швидкості різання [12]:

$$\Delta\tau = \mu v_{\delta} / \lambda, \quad (5)$$

де  $\lambda$  - товщина відокремлюваного елемента стружки,  $\mu$  - динамічний коефіцієнт в'язкості [10].

$$\lambda = \mu / (\gamma_{об} v_p), \quad (6)$$

Формулу (4) для граничної дотичної напруги можна записати у вигляді:  $\tau_n = m_v \tau_0$  [10], де

$$m_v = 1 + \Delta\tau / \tau_0. \quad (7)$$

Підставивши у вираз (7) значення  $\Delta\tau$  і  $\tau_0$  згідно (3), (5), (6), отримаємо, що коефіцієнт впливу швидкості різання рівний:

$$m_v = 1 + v_{\delta} / v_p. \quad (8)$$

Необхідно зазначити, що дослідження ведуться відносно максимального значення сили, яка виникає безпосередньо в момент перед відділенням наступного елемента стружки. Саме в цей момент напруження на поверхні руйнування досягають максимального значення.

З урахуванням в'язких властивостей ґрунту і їх впливом на граничний опір зсуву, а також прийнявши, що опір різанню пропорційний опорі зсуву, сила, необхідна для утворення стружки:

$$P = m_v P_0 = (1 + v_{\delta} / v_p) P_0, \quad (9)$$

де  $P_0$  - сила різання при швидкості, близькій до нуля.

Підставляємо у формулу (9) значення швидкості деформування згідно виразу (2), отримуємо коефіцієнт впливу швидкості різання:

$$m_v = 1 + v / v_{кр}. \quad (10)$$

де  $v_{кр}$  - критична швидкість різання, при якій змінюється природа руйнування ґрунту [12]:

$$v_{кр} = v_p \sin(\alpha_p + \psi) / \sin \psi. \quad (11)$$

Враховуючи останній вираз, отримаємо:

$$P = (1 + v / v_{кр}) P_0 \quad (12)$$

Ю.А. Ветров [3] визначив додаткову силу різання для передачі руху елементам стружки, що відділяються, по наступній формулі:

$$\Delta P_{кин} = F_{cp} \gamma_{об} v^2 \frac{\sin \alpha_p \cos \psi}{\sin(\alpha_p + \psi)}, \quad (13)$$

де  $F_{cp}$  - площа поперечного перерізу зрізу.

В кінцевому вигляді сила для відкидання масиву ґрунту, що відділяється:

$$\Delta P_{кин} = m_v F_{cp} \gamma_{об} v^2 \frac{\sin \alpha_p \cos \psi}{\sin(\alpha_p + \psi)}. \quad (14)$$

Сумарна сила різання гострим ножом з урахуванням швидкості та залежностей (1), (9) та (14):

$$P_v = m_v \left[ P_0 + \gamma_{об} v^2 F_{cp} \frac{\sin \alpha_p \cos \psi}{\sin(\alpha_p + \psi)} \right]. \quad (15)$$

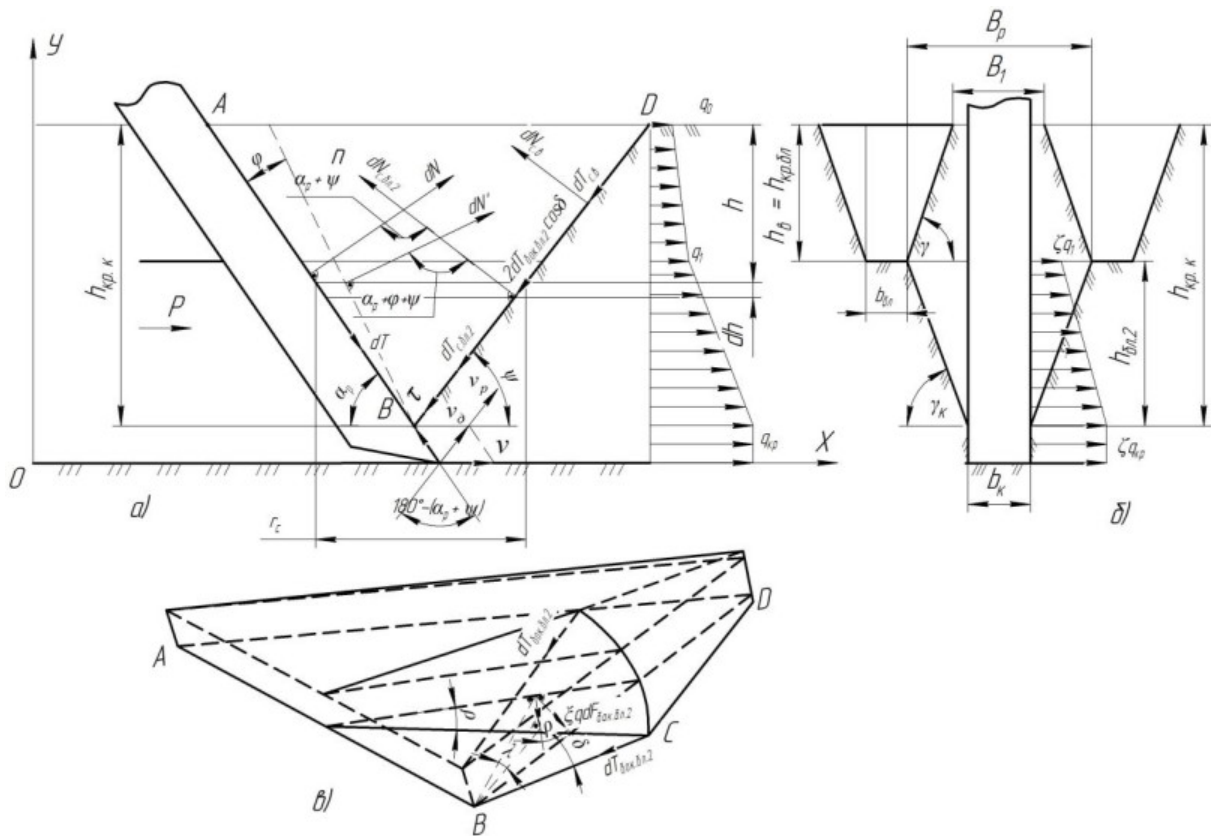


Рис. 1 Схема взаємодії ножа з ґрунтовим середовищем при комбінованому різанні ґрунту: а - у повздожній площині; б - у поперечній площині; в - форма елемента стружки у процесі заглиблення ножа

Середній нормальний тиск ґрунту на лобову поверхню ножа по глибині при блокованому різанні матиме вигляд [7, 13]:

$$q(h) = \frac{P_V \cos \varphi \sin \alpha_p}{b_k h_{0.2} \sin(\alpha_p + \varphi)} = \left(1 + \frac{v}{v_{kp}}\right) \times \left( q_1 + \frac{q_{kp} - q_1}{2} k_{nep} + \frac{\gamma_{zp}}{g} \left(1 + \frac{h}{b_k} \operatorname{ctg} \gamma\right) \times \left( \frac{\sin^2 \alpha_p \cos \psi \cos \varphi}{\sin(\alpha_p + \psi) \sin(\alpha_p + \varphi)} v^2 \right) \right) \quad (16)$$

де  $q_1$  - максимальний тиск ґрунту на ніж у верхньому ярусі при вільному різанні;  $q_1$  - критичне значення тиску;  $b_k$  - ширина ножа;  $\gamma_{zp}$  - питома сила тяжіння ґрунту;  $g$  - прискорення вільного падіння;  $\alpha_p$  - кут різання ґрунту;  $\varphi$  - кут зовнішнього тертя ґрунту;  $\psi$  - кут зсуву ґрунту в повздожній площині,  $k_{nep}$  - відношення глибини зони гарантованого сколювання ґрунту ( $k_{nep}=0,9\dots0,95$ );  $h$  - поточне значення глибини.

Закон розподілу нормального тиску на лобову поверхню ножа по глибині для вільного різання з врахуванням швидкості та трапецеїдальної форми лобової площини зсуву запишеться у вигляді [11]:

$$q(h) = \frac{P \cos \varphi \sin \alpha_p}{b_k h_g \sin(\alpha_p + \varphi)} = \left(1 + \frac{v}{v_{kp}}\right) \times \left( q_0 \left(1 + \frac{h_g}{b_k} \operatorname{ctg} \gamma\right) + \frac{\gamma_{zp}}{g} \left(1 + \frac{2 \cdot \operatorname{ctg} \gamma_k}{b_k} h_{0.2} + \frac{\operatorname{ctg} \gamma}{b_k} h - \frac{h_g \cdot \operatorname{ctg} \gamma}{b_k}\right) \times \left( \frac{\sin^2 \alpha_p \cos \psi \cos \varphi}{\sin(\alpha_p + \psi) \sin(\alpha_p + \varphi)} v^2 \right) \right) \quad (17)$$

де  $q_0$  - мінімальне значення тиску, який діє на денній поверхні;  $h_g, h_{0.2}$  - глибина розробки ґрунту при вільному та блокованому різанні відповідно;  $\gamma, \gamma_k$  - кути розвалу зон розпушення при комбінованому різанні у верхньому та нижньому ярусах відповідно.

Значення тиску ґрунту при вільному різанні у верхньому ярусі (при  $h = h_{0.2}$ ) визначається за формулою [7]:

$$q_1 = q_0 \cdot \left( 1 + \frac{h_6}{b_k} \cdot ctg\gamma \right) \quad (18)$$

На елементарний об'єм елемента стружки висотою  $dh$  в момент попередній сколюванню діють наступні сили, які приведені у вертикальну площину ABD (рис. 1, а): активна

сила  $dN' = \frac{dN}{\cos\varphi}$ , яка направлена під кутом

зовнішнього тертя ґрунту  $\varphi$  до нормалі лобової площини ножа; нормальна реакція  $dN_{c.6}$  – для вільного різання і  $dN_{c.6л}$  – для блокованого різання, і дотичні сили  $dT_{c.6}$  – для вільного і  $dT_{c.6л}$ ,  $2 dT_{бок.6л} \cos\delta$  – для блокованого різання в площині зсуву ґрунту.

Тоді система рівнянь рівноваги всіх сил на нормальну ( $n$ ) і дотичну ( $\tau$ ) осі до лобової площини сколювання матиме вигляд:

$$\begin{cases} \Sigma P_n = dN_{c.6} + dN_{c.6л} + \\ + dN' \cos(\alpha_p + \varphi + \psi) = 0 \\ \Sigma P_\tau = dT_{c.6} + dT_{c.6л} + 2dT_{бок.6л} \cos\delta - \\ - dN' \sin(\alpha_p + \varphi + \psi) = 0 \end{cases} \quad (19)$$

З першого рівняння системи (19) маємо:

$$\begin{aligned} dN_{c.6} + dN_{c.6л} &= -\frac{dN}{\cos\varphi} \cos(\alpha_p + \varphi + \psi) = \\ &= -\frac{\cos(\alpha_p + \varphi + \psi) dh b_k}{\cos\varphi \cdot \sin\alpha_p} b_k \left( 1 + \frac{v}{v_{кр}} \right) \times \\ &\times \left( q_0 \left( 1 + \frac{h_6}{b_k} ctg\gamma \right) + \right. \\ &\times \left. + \frac{\gamma_{зп}}{g} \left( 1 + \frac{2 \cdot ctg\gamma_k h_{6л2}}{b_k} + \right. \right. \\ &\times \left. \left. + \frac{ctg\gamma}{b_k} h - \frac{h_6 \cdot ctg\gamma}{b_k} \right) \times - \right. \\ &\times \left. \frac{\sin^2 \alpha_p \cos\psi \cos\varphi}{\sin(\alpha_p + \psi) \sin(\alpha_p + \varphi)} v^2 \right) \\ &- \frac{\cos(\alpha_p + \varphi + \psi) dh b_k}{\cos\varphi \cdot \sin\alpha_p} b_k \left( 1 + \frac{v}{v_{кр}} \right) \times \\ &\times \left( q_1 + \frac{q_{кр} - q_1}{2} k_{неп} + \frac{\gamma_{зп}}{g} \left( 1 + \frac{h}{b_k} ctg\gamma \right) \times \right. \\ &\times \left. \frac{\sin^2 \alpha_p \cos\psi \cos\varphi}{\sin(\alpha_p + \psi) \sin(\alpha_p + \varphi)} v^2 \right) \end{aligned} \quad (20)$$

Елементарні дотичні сили, які діють у лобовій ( $dT_{c.6}$ ,  $dT_{c.6л}$ ) і боковій ( $dT_{бок.6л}$ ) площинах сколювання визначаються по закону Кулона для ґрунтів.

$$dT_{c.6} = tg\varphi_0 dN_{c.6} + c dF_{c.6} \quad (21)$$

$$dT_{c.6л} = tg\varphi_0 dN_{c.6л} + c dF_{c.6л} \quad (22)$$

$$dT_{бок.6л} = (\xi q \cos\rho \cos\lambda tg\varphi_0 + c) dF_{c.бок.6л} \quad (23)$$

де  $dF_{c.6}$ ,  $dF_{c.6л}$ ,  $dF_{c.бок.6л}$ , - елементарні площі відповідно лобової площини сколювання при вільному і блокованому різанні та бокові площини сколювання при блокованому різанні;  $\rho$ ,  $\delta$ ,  $\lambda$ , - кути які утворюються боковою площиною сколювання з вертикальною площиною (рис. 1, в).

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

$$dT_{бок.6л} = c \cdot dF_{c.бок.6л}, \quad (24)$$

Максимальна  $B_p$  і мінімальна  $B_l$  ширини тіла сколу рівні (рис. 1, б):

$$B_p = 2h_{6л2} ctg\gamma_k + b_k; \quad (25)$$

$$B_l = 2h_{6л2} ctg\gamma_k + b_k - 2h_6 ctg\gamma; \quad (26)$$

При цьому елементарні площі будуть визначатися залежностями:

$$dF_{c.6} = \left( \frac{2h_{6л2} ctg\gamma_k - h_6 ctg\gamma +}{+ b_k + h ctg\gamma} \right) \frac{dh}{\sin\psi}; \quad (27)$$

$$\begin{aligned} dF_{c.6л} &= (b_k + 2\rho r_c) \frac{dh}{\sin\psi} = \\ &= (b_k + 2\rho(ctg\psi + ctg\alpha_p)) \cdot (h_{6л2} - h) \frac{dh}{\sin\psi} \end{aligned} \quad (28)$$

$$\begin{aligned} dF_{бок.6л} &= r_c \frac{dh}{\cos\lambda} = \\ &= (ctg\psi + ctg\alpha_p) \cdot (h_{6л2} - h) \frac{dh}{\cos\lambda} \end{aligned} \quad (29)$$

де  $r_c$  – поточне значення радіуса сколювання ґрунту.

Критична глибина при комбінованому поперемному руйнуванню ґрунту буде рівна:

$$h_{кр.к} = h_6 + h_{6л2}. \quad (30)$$

Якщо підставити вирази (21), (22), і (23) в друге рівняння системи (19) з врахуванням рівностей (25), (26), (27), (28) і (29) отримаємо рівняння:

$$\begin{aligned}
 & -tg \varphi_0 \frac{\cos(\alpha_p + \varphi + \psi)}{\cos \varphi \cdot \sin \alpha_p} \cdot b_{\kappa} \cdot \left(1 + \frac{v}{v_{кр}}\right) \times \\
 & \left( q_0 \left(1 + \frac{h_6}{b_{\kappa}} ctg \gamma\right) + \right. \\
 & \left. \times \frac{\gamma_{zp}}{g} \left( \frac{1 + \frac{2ctg \gamma_{\kappa} h_{\delta_{л2}}}{b_{\kappa}}}{+ \frac{ctg \gamma}{b_{\kappa}} h - \frac{h_6 \cdot ctg \gamma}{b_{\kappa}}} \right) \times \right. \\
 & \left. \times \frac{\sin^2 \alpha_p \cos \psi \cos \varphi}{\sin(\alpha_p + \psi) \sin(\alpha_p + \varphi)} v^2 \right) dh + \\
 & + c \cdot \left( \frac{2h_{\delta_{л2}} ctg \gamma_{\kappa} - h_6 ctg \gamma}{+ b_{\kappa} + h ctg \gamma} \right) \frac{dh}{\sin \psi} - \\
 & -tg \varphi_0 \frac{\cos(\alpha_p + \varphi + \psi)}{\cos \varphi \cdot \sin \alpha_p} \cdot b_{\kappa} \cdot \left(1 + \frac{v}{v_{кр}}\right) \times \\
 & \left( q_1 + \frac{q_{кр} - q_1}{h_{кр}} h k_{неp} + \right. \\
 & \left. \times \frac{\gamma_{zp}}{g} \left(1 + \frac{h}{b_{\kappa}} ctg \gamma\right) \times \right. \\
 & \left. \times \frac{\sin^2 \alpha_p \cos \psi \cos \varphi}{\sin(\alpha_p + \psi) \sin(\alpha_p + \varphi)} v^2 \right) dh + \\
 & + c \cdot \left( \frac{b_{\kappa} + 2\rho(ctg \psi + ctg \alpha_p)}{\times (h_{\delta_{л2}} - h)} \right) \frac{dh}{\sin \psi} + \\
 & + 2 \cos \delta \cdot c (ctg \psi + ctg \alpha_p) (h_{\delta_{л2}} - h) \frac{dh}{\cos \lambda} - \\
 & - \frac{\sin(\alpha_p + \varphi + \psi)}{\cos \varphi \cdot \sin \alpha_p} \cdot b_{\kappa} \cdot \left(1 + \frac{v}{v_{кр}}\right) \times \\
 & \left( q_0 \left(1 + \frac{h_6}{b_{\kappa}} ctg \gamma\right) + \right. \\
 & \left. \times \frac{\gamma_{zp}}{g} \left( \frac{1 + \frac{2ctg \gamma_{\kappa} h_{\delta_{л2}}}{b_{\kappa}}}{+ \frac{ctg \gamma}{b_{\kappa}} h - \frac{h_6 \cdot ctg \gamma}{b_{\kappa}}} \right) \times \right. \\
 & \left. \times \frac{\sin^2 \alpha_p \cos \psi \cos \varphi}{\sin(\alpha_p + \psi) \sin(\alpha_p + \varphi)} v^2 \right) dh - \\
 & - \frac{\sin(\alpha_p + \varphi + \psi)}{\cos \varphi \cdot \sin \alpha_p} \cdot b_{\kappa} \cdot \left(1 + \frac{v}{v_{кр}}\right) \times \\
 & \left( q_1 + \frac{q_{кр} - q_1}{h_{кр}} h k_{неp} + \right. \\
 & \left. \times \frac{\gamma_{zp}}{g} \left(1 + \frac{h}{b_{\kappa}} ctg \gamma\right) \times \right. \\
 & \left. \times \frac{\sin^2 \alpha_p \cos \psi \cos \varphi}{\sin(\alpha_p + \psi) \sin(\alpha_p + \varphi)} v^2 \right) dh = 0
 \end{aligned} \tag{31}$$

Після інтегрування рівняння (31) та його спрощення, проводимо заміни

$$\begin{aligned}
 & \frac{\sin(\alpha_p + \varphi + \varphi_0 + \psi)}{\cos \varphi \cdot \cos \varphi_0 \cdot \sin \alpha_p} \cdot b_{\kappa} \cdot \left(1 + \frac{v}{v_{кр}}\right) \Rightarrow X; \\
 & \frac{\gamma_{zp}}{g} \frac{\sin^2 \alpha_p \cos \psi \cos \varphi}{\sin(\alpha_p + \psi) \sin(\alpha_p + \varphi)} v^2 \Rightarrow Y.
 \end{aligned} \tag{32}$$

та

$$h_{кр.к.} = h_6 + h_{\delta_{л2}} \Rightarrow h_{\delta_{л2}} = h_{кр.к.} - h_6 \tag{33}$$

Виокремлюємо значення критичної глибини комбінованого різання  $h_{кр.к.}$ :

$$\begin{aligned}
 & \left[ c(ctg \psi + ctg \alpha_p) \times \right. \\
 & \left. \times \left( \frac{\rho}{\sin \psi} + \frac{\cos \delta}{\cos \lambda} \right) - XY \frac{ctg \gamma}{2b_{\kappa}} \right] h_{кр.к.}^2 - \\
 & \left[ -XY \frac{2c \cdot ctg \gamma_{\kappa} h_6}{\sin \psi} + \frac{2c \cdot ctg \gamma_{\kappa} h_6}{\sin \psi} - \right. \\
 & - Xq_1 + X \cdot \frac{q_{кр} - q_1}{2} k_{неp} - XY + \\
 & \left. + XY \frac{h_6 ctg \gamma_{\kappa}}{b_{\kappa}} + \frac{cb_{\kappa}}{\sin \psi} + \right. \\
 & \left. + 2c(ctg \psi + ctg \alpha_p) \right. \\
 & \left. \times \left( \frac{\rho}{\sin \psi} + \frac{\cos \delta}{\cos \lambda} \right) h_6 \right] +
 \end{aligned} \tag{34}$$

(продовження формули (34) на наступній сторінці)

(продовження формули (34):

$$\begin{aligned}
 & \left[ -Xq_0 \left( h_6 + \frac{h_6^2 \operatorname{ctg} \gamma}{2b_\kappa} \right) + XY \frac{2 \operatorname{ctg} \gamma_\kappa h_6^2}{b_\kappa} + \right. \\
 & \left. + XY \frac{\operatorname{ctg} \gamma h_6^2}{2b_\kappa} - \frac{2c \cdot \operatorname{ctg} \gamma_\kappa h_6^2}{\sin \psi} - \right. \\
 & \left. + \frac{c \cdot h_6^2 \cdot \operatorname{ctg} \gamma}{\sin \psi} + X \cdot q_1 h_6 + \right. \\
 & \left. + X \cdot \frac{q_{\text{кр}} - q_1}{2} k_{\text{неп}} h_6 + XY \frac{h_6^2 \operatorname{ctg} \gamma}{2b_\kappa} + \right. \\
 & \left. + c \left( \operatorname{ctg} \psi + \operatorname{ctg} \alpha_p \right) \left( \frac{\rho}{\sin \psi} + \frac{\cos \delta}{\cos \lambda} \right) h_6^2 \right] = 0
 \end{aligned}$$

У рівняння (34) підставляємо заміну (32) і знаходимо критичну глибину при комбінованому руйнуванні ґрунту з урахуванням швидкості:

$$h_{\text{кр.к}} = \frac{-B - \sqrt{B^2 - 4 \cdot A \cdot C}}{2 \cdot A}; \quad (35)$$

де

$$\begin{aligned}
 A = & \left( \operatorname{ctg} \psi + \operatorname{ctg} \alpha_p \right) c \left( \frac{\rho}{\sin \psi} + \frac{\cos \delta}{\cos \lambda} \right) - \\
 & - \frac{\sin(\alpha_p + \varphi + \varphi_0 + \psi)}{\cos \varphi \cdot \cos \varphi_0 \cdot \sin \alpha_p} \cdot b_\kappa \cdot \left( 1 + \frac{v}{v_{\text{кр}}} \right) \times \\
 & \times \frac{\gamma_{\text{зп}}}{g} \frac{\sin^2 \alpha_p \cos \psi \cos \varphi}{\sin(\alpha_p + \psi) \sin(\alpha_p + \varphi)} v^2 \cdot \frac{\operatorname{ctg} \gamma}{2b_\kappa};
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 B = & - \frac{\sin(\alpha_p + \varphi + \varphi_0 + \psi)}{\cos \varphi \cos \varphi_0 \sin \alpha_p} b_\kappa \left( 1 + \frac{v}{v_{\text{кр}}} \right) \times \\
 & \times \left( q_1 + \frac{q_{\text{кр}} - q_1}{2} k_{\text{неп}} + \right. \\
 & \left. + \frac{\gamma_{\text{зп}}}{g} \frac{\sin^2 \alpha_p \cos \psi \cos \varphi}{\sin(\alpha_p + \psi) \sin(\alpha_p + \varphi)} v^2 \times \right. \\
 & \left. \times \left( \frac{2 \cdot \operatorname{ctg} \gamma_\kappa \cdot h_6}{b_\kappa} - \frac{h_6 \cdot \operatorname{ctg} \gamma}{b_\kappa} + 1 \right) \right) + \\
 & + (2h_6 \operatorname{ctg} \gamma_\kappa + b_\kappa) \frac{c}{\sin \psi} - \\
 & - 2 \cdot c \cdot \left( \operatorname{ctg} \psi + \operatorname{ctg} \alpha_p \right) \left( \frac{\rho}{\sin \psi} + \frac{\cos \delta}{\cos \lambda} \right) \cdot h_6; \\
 C = & \frac{\sin(\alpha_p + \varphi + \varphi_0 + \psi)}{\cos \varphi \cos \varphi_0 \sin \alpha_p} b_\kappa \left( 1 + \frac{v}{v_{\text{кр}}} \right) h_6 \times \\
 & \times \left( \frac{q_{\text{кр}} - q_1}{2} k_{\text{неп}} + \right. \\
 & \left. \times \frac{\gamma_{\text{зп}}}{g} \frac{\sin^2 \alpha_p \cos \psi \cos \varphi}{\sin(\alpha_p + \psi) \sin(\alpha_p + \varphi)} \times \right. \\
 & \left. \times v^2 \frac{2 \cdot \operatorname{ctg} \gamma_\kappa \cdot h_6}{b_\kappa} \right) - \\
 & - \left( 2h_6^2 \operatorname{ctg} \gamma_\kappa + \frac{h_6^2 \operatorname{ctg} \gamma}{2} \right) \frac{c}{\sin \psi} + \\
 & + c \cdot \left( \operatorname{ctg} \psi + \operatorname{ctg} \alpha_p \right) \left( \frac{\rho}{\sin \psi} + \frac{\cos \delta}{\cos \lambda} \right) \cdot h_6^2
 \end{aligned}$$

Значення відносної глибини сколювання з врахуванням робочої швидкості занесено в таблицю 1.

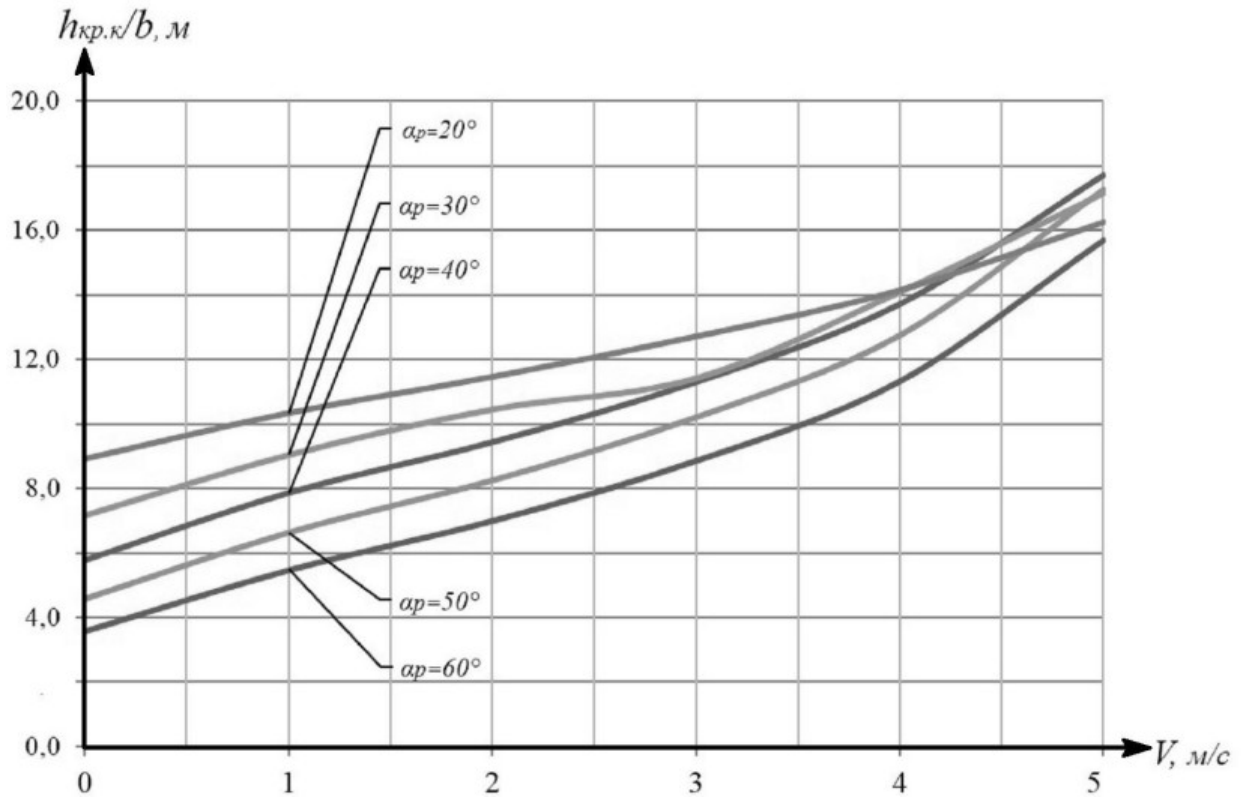


Рис. 2. Залежність відносної критичної глибини комбінованого різання ґрунту  $h_{кр.к}$  від швидкості  $V$  при зміні кута різання  $\alpha_p$  для напівтвердого суглинку.

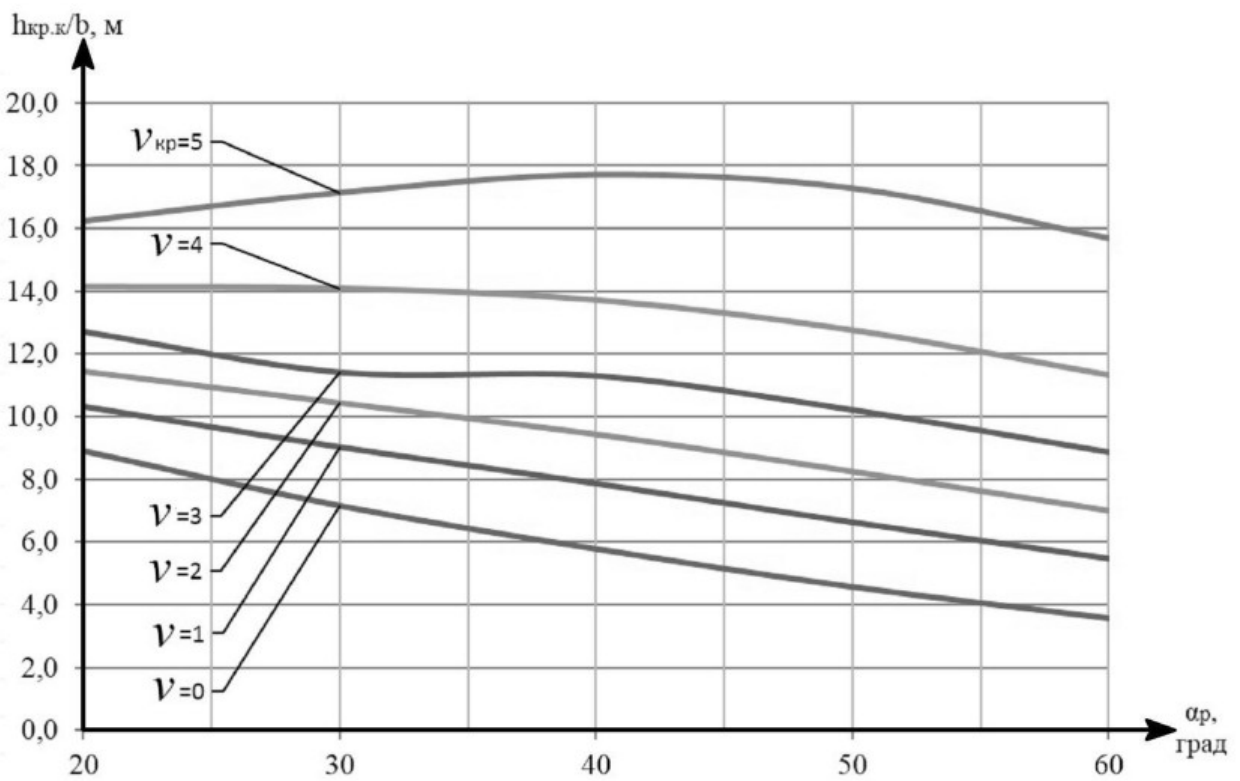


Рис. 3. Залежність відносної критичної глибини комбінованого різання ґрунту  $h_{кр.к}$  від кута різання  $\alpha_p$  при зміні швидкості  $V$  для напівтвердого суглинку



Таблиця 1

**Значення відносної критичної глибини**

Напівтвердий суглинок							Твердий супісок						
$\nu, \frac{m}{c}$ $\alpha_p, ^\circ$	0	1	2	3	4	5,18	$\nu, \frac{m}{c}$ $\alpha_p, ^\circ$	0	1	2	3	4	4,45
20	8,90	10,32	11,44	12,69	14,13	16,24	20	12,28	14,13	16,00	18,30	21,25	22,99
30	7,16	9,02	10,44	11,40	14,07	17,13	30	9,73	12,10	14,42	17,50	21,99	24,72
40	5,78	7,86	9,43	11,29	13,70	17,69	40	7,73	10,47	13,06	16,58	22,15	25,88
50	4,58	6,63	8,25	10,20	12,75	17,27	50	6,03	8,72	11,37	15,02	20,93	25,07
60	3,58	5,47	7,00	8,86	11,33	15,69	60	4,53	6,94	9,29	12,64	18,21	22,19
Тугопластична глина							Твердий суглинок						
$\nu, \frac{m}{c}$ $\alpha_p, ^\circ$	0	1	2	3	4	5,55	$\nu, \frac{m}{c}$ $\alpha_p, ^\circ$	0	1	2	3	4	7,13
20	8,28	10,80	11,56	12,44	13,47	15,45	20	9,60	10,35	11,17	12,07	13,05	17,37
30	6,83	9,16	10,20	11,44	12,98	16,33	30	7,80	8,93	9,97	11,14	12,48	18,97
40	5,59	7,79	9,05	10,58	12,53	17,10	40	6,25	7,58	8,49	10,06	11,63	19,81
50	4,43	6,39	7,73	9,39	11,58	16,95	50	4,92	6,32	7,49	8,83	10,46	19,77
60	3,33	5,13	6,60	8,44	10,94	17,64	60	3,64	4,83	6,01	7,35	8,99	19,05

**Висновки.**

1. В даній роботі було визначено математичну модель критичної глибини комбінованого різання з врахуванням робочої швидкості при умові, що глибини різання у верхньому і нижньому ярусах дорівнюють відповідним глибинам блокованого і комбінованого різання.

2. Розрахункові залежності показують, що при зменшенні кута різання ножа від  $60^\circ$  до  $20^\circ$  відносна глибина сколювання без врахування робочої швидкості ( $h_{кр.к}/b$ ) збільшується. Для ґрунтів другої категорії: твердий супісок від 4,5 до 12,2; напівтвердий суглинок від 3,58 до 8,9; тугопластична глина від 3,34 до 8,28. Для ґрунтів третьої категорії:

твердий суглинок від 3,75 до 9,53; напівтверда глина від 3,55 до 8,47.

3. Згідно розрахункових залежностей, при збільшенні робочої швидкості  $\nu$  з 0 м/с до 4 м/с відносна критична глибина комбінованого різання  $h_{кр.к}$  зростає з 3,58 до 14,13 м для напівтвердого суглинка; з 4,53 до 22,15 для твердого супіску; з 3,33 до 13,47 для тугопластичної глини в залежності від кута різання.

**СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ**

1. Алексеева Т. В. Дорожные машины. Ч.1 / Алексеева Т. В., Артемьев К. А., Бромерг А. А. [и др.] – М.: Машиностроение, 1972. – 504 с.
2. Баладинский В. Л. Производительность и долговечность землеройных мелиоративных машин / Баладинский В. Л., Пузичев Ю. В., Смирнов В. Н., Кисленко А. А. К.: Урожай, 1988 – 152 с.
3. Ветров Ю. А. Резание ґрунтов землеройными машинами. – М.: Машиностроение, 1971. 360 с.
4. Вплив швидкості на критичну глибину різання / С. В. Кравець, Р. В. Зоря // Вісник НУВГП, Технічні науки. Вип. 72(4), Рівне, 92 – 103 с, 2015 р.
5. Визначення критичної глибини різання при комбінованому поярусному руйнуванні ґрунту / С. В. Кравець, О. В. Стіньо // Строительство. Материаловедение. Машиностроение. Серия : Подъёмно-транспортные, строительные и дорожные машины и оборудование. - 2013. - Вып. 72. - С. 128-137.
6. Визначення сили блокованого різання та коефіцієнта енергоємності розпушування ґрунту / С. В. Кравець, О. В. Стіньо // Науковий вісник НГУ, № 3, 2016, 24 – 28 с.
7. Кравець С. В., Кованько В. В., Лук'яничук О. П. Наукові основи створення землеройно-ярусних машин і підземнорухомих пристроїв. Монографія. – Рівне: НУВГП, 2015. – 322 с.
8. Кравець С. В. Вплив гідростатичного тиску на критичну глибину при комбінованому поярусному різанні ґрунту / Кравець С.В., Романовський О.Л., Кирикович В.Д., Музичук І.М. // «Вісник» Національний університет водного господарства та природокористування. Зб. наук. пр., випуск 2 (34) Ч. 2., Рівне 2006. – С. 236-243.
9. Кравець С. В. Ґрунтозахисні та енергозберігаючі машини для прокладання підземних комунікацій. / С.В. Кравець. – Рівне: РДТУ, 1999 – 278 с.
10. Лойцянский Л. Г. Основы механики вязкой жидкости; в 2-х вып. - Ленинград : КУБУЧ , 1932 – 1933. – 111 с.

11. Машини для земляных работ / Хмара Л. А. і ін. Рівне – Дніпропетровськ – Харків. – 2010. – 557 с.
12. Станевский В. П. Совершенствование рабочего процесса землеройных машин. – Киев: ВШ, 1984. – 127 с.
13. Томин Е. Д. Бестраншейное строительство закрытого дренажа / Томин Е. Д. – М.: Колос, 1981 – 240 с.

#### REFERENCES

1. Alekseeva T. V., Artem`ev K. A., Bromberg A. A. *Dorognue mashuny* [Road machines], Part 1, - M.: Mashinostroenie, 1972. – 502 p. (in Russian).
2. Baladinskij V. L., Pyzuchev Y. V., Smurnov V. N., Kuslenko A. A. *Proizvoditel`nost` i dolgovechnost` zemleroinykh meliorativnykh mashin* [Performance and durability of earth-moving reclamation machines] / K.: Yrogai, 1988, – 152 p. (in Russian).
3. Vetrov Y. A. *Rezanie gruntov zemleroinumy mashinamy* [Cutting of the soil by earth-moving machines] – M.: Mashinostroenie, 1971, - 360 p. (in Russian).
4. Kravets S. V., Zoria R. V. *Vplyv shvydkosti na krutuchny glubuny rizannia* [Influence of speed on critical cutting depth] / Visnuk NUWEE, Technical sciences. Vup. 72 (4), Rivne, 92 – 103 p. (in Ukrainian).
5. Kravets S. V., O. V. Stinio *Vuznachennia krytychnoi glubuny rizannia pru kombinovanomy poyarysnomy ruinyvanni grunty* [Definition of critical depth by combined tiered destruction of the soil] / Stroitel'stvo. Materialovedenie. Mashinostroenie. Seria: Podemnotransportnye, stroitel' nye u dorognye mashyny i oborydovanie. – 2013. – Vyp. 72. – P. 128 – 137 p.
6. Kravets S. V., Stinio O. V. *Vuznachennia suly blokovanogo rizannia ta koeficienta enegoemnosti rozpyshennia grunty* [Definition of force and energy intensity factor of blocked soil cutting] / Naukovy visnuk NGY, № 3, 2016, - 24 – 28 pp.
7. Kravets S. V., Kovan`ko V. V., Lyk`ianchuk O. P. *Naukovi osnovu stvorennia zemlerui-yarysnykh mashyn I pidzemnoryhomykh prustroiv* [Scientific basis of creating earth-tiered machines and underground devices] – Rivne: NUWEE, 2015. – 322 p.
8. Kravets S. V., Romanovskiy O. L., Kyrykovych V. D. Myzuchyk I. M. *Vpluv hidrostatchnogo tuskyy na krutuchny hlubuny pru kombinovanomy poyarysnomy rizanni grunty* [Effect of hydrostatic pressure on critical depth of the combined Tiered cutting soil] // "Vistnik" NUWEE, Zb. Nayk. Prac, vup. 2 (34), Rivne, 2006. – 236 – 243 pp.
9. Kravets S. V. *Hruntozahystni ta energozberigaychi mashyny dlia prokladannia pidzemnykh komunikacij* [Soil and energy-saving machine for laying underground communications]. – Rivne: RDTY, 1999 – 278 p.
10. Loicianskiy L. G. *Osnovy mehaniky viazkoy gidkosti* [Fundamentals of viscous fluid mechanics] – Leningrad: KYBYCH, 1933. – 111 p.
11. Hmara L. A. and others *Mashyny dlia zemlianykh robot* [Earth-moving machinery] – Rivne – Dnipro – Kharkiv – 2010. – 557 p.
12. Stanievskiy V. P. *Sovershenstvovanie rabocheho procesa zemleroinykh mashin* [Improving of workflow earthmoving machinery] - Kiev: VSH, - 1984. – 124 p.
13. Tomin E. D. *Beztransheinoe stroitel'stvo zakrytogo drenaga* [Trenchless construction of subsurface drainage] – M.: Koloss, 1981, - 240 p.