

УДК 624.132.3

## ВИЗНАЧЕННЯ КРИТИЧНОЇ ГЛИБИНИ РІЗАННЯ ГРУНТУ БОКОВИМИ РІЗЦЯМИ (ЗУБАМИ) ТРАНШЕЙНИХ ЕКСКАВАТОРІВ

КРАВЕЦЬ С. В.<sup>1</sup>, *д. т. н., проф.*  
 ЛУК'ЯНЧУК О. П.<sup>2</sup>, *к. т. н., доц.*  
 КОСЯК О. В.<sup>3</sup>, *к. т. н., старший викладач.*  
 ГАПОНОВ О. О.<sup>4</sup>, *аспірант.*  
 ЯНЧИК Т. О.<sup>5</sup>, *студент.*

<sup>1</sup> Кафедра будівельних, дорожніх, меліоративних, сільськогосподарських машин та обладнання (БДМСМіО), Національний університет водного господарства та природокористування (НУВГП), вул. Соборна, 11, м. Рівне, Україна, 33028, тел. +38(097)2891589, e-mail: s.v.kravets@nuwm.edu.ua, ORCID ID: 0000-0003-4063-1942.

<sup>2</sup> Кафедра будівельних, дорожніх, меліоративних, сільськогосподарських машин та обладнання (БДМСМіО), Національний університет водного господарства та природокористування (НУВГП), вул. Соборна, 11, м. Рівне, Україна, 33028, тел. +38(095)7906424, e-mail: o.p.lukyanchuk@nuwm.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-0892-545X.

<sup>3</sup> Кафедра будівельних, дорожніх, меліоративних, сільськогосподарських машин та обладнання (БДМСМіО), Національний університет водного господарства та природокористування (НУВГП), Соборна, 11, м. Рівне, Україна, 33028, тел. +38(067)3602359, e-mail: o.v.kosiak@nuwm.edu.ua, ORCID ID: 0000-0003-0653-3994.

<sup>4</sup> Кафедра будівельних і дорожніх машин (БДМ), Харківський національний автомобільно-дорожній університет (ХНАДУ), вул. Ярослава Мудрого, 25, м. Харків, Україна, 61002, тел. +38(067)2885687, e-mail: alef@khadi.kharkov.ua, ORCID ID: 0000-0002-7853-3005.

<sup>5</sup> Навчально-науковий механічний інститут (ННМІ), Національний університет водного господарства та природокористування (НУВГП), вул. Соборна, 11, м. Рівне, Україна, 33028, e-mail: yanchyk\_m15@nuwm.edu.ua, ORCID ID: 0000-0001-5209-7666.

**Анотація. Постановка проблеми.** Копання траншей однокішшеви та багатокішшеви екскаваторами здійснюється в умовах 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. Енергоємність робочого процесу значно підвищується при закритичних значеннях стружки за рахунок запресування частини ґрунту. Тому розрахунок параметрів однокішшевих і багатокішшевих траншейних екскаваторів необхідно здійснювати на основі критичноглибинного різання ґрунтів. **Мета статті.** Визначимо критичну глибину асиметричного блокованого різання ґрунту в траншеї біля вертикальної стінки, яка обмежує простір руйнування різця з однієї сторони. **Висновки.** 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. **Наукова новизна.** Отримано математичні моделі для визначення критичної глибини різання для крайніх бокових різців багатоскребкових ланцюгових траншейних екскаваторів, що працюють в умовах асиметричного бокового різання та напівблокованого різання. **Практична цінність.** За отриманими апроксимованими математичними моделями у кожному конкретному випадку, на основі даних про талі ґрунти, що рекомендують БНіП, стало можливим у залежності від кута різання різця в межах кута різання 20°...50° визначити раціональну глибину різання для крайніх бокових різців багатоскребкових ланцюгових траншейних екскаваторів.

**Ключові слова:** багатокішшеві екскаватори, бокові різці, робочий процес, різання ґрунту, критична глибина

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ КРИТИЧЕСКОЙ ГЛУБИНЫ РЕЗАНИЯ ГРУНТА БОКОВЫМИ РЕЗЦАМИ (ЗУБАМИ) ТРАНШЕЙНЫХ ЭКСКАВАТОРОВ

КРАВЕЦ С. В.<sup>1</sup>, *д. т. н., проф.*  
 ЛУК'ЯНЧУК А. П.<sup>2</sup>, *к. т. н., доц.*  
 КОСЯК А. В.<sup>3</sup>, *к. т. н., старший преподаватель.*  
 ГАПОНОВ А. А.<sup>4</sup>, *аспирант.*  
 ЯНЧИК Т. О.<sup>5</sup>, *студент.*

<sup>1</sup> Кафедра строительных, дорожных, мелиоративных, сельскохозяйственных машин и оборудования (БДМСМиО), Национальный университет водного хозяйства и природопользования (НУВХП), ул. Соборная, 11, г. Ровно, Украина, 33028, тел. +38(097)2891589, e-mail: s.v.kravets@nuwm.edu.ua, ORCID ID: 0000-0003-4063-1942.

<sup>2</sup> Кафедра строительных, дорожных, мелиоративных, сельскохозяйственных машин и оборудования (БДМСМиО), Национальный университет водного хозяйства и природопользования (НУВХП), ул. Соборная, 11, г. Ровно, Украина, 33028, тел. +38(095)7906424, e-mail: o.p.lukyanchuk@nuwm.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-0892-545X.

<sup>3</sup> Кафедра строительных, дорожных, мелиоративных, сельскохозяйственных машин и оборудования (БДМСМиО), Национальный университет водного хозяйства и природопользования (НУВХП), ул. Соборная, 11, г. Ровно, Украина, 33028, тел. +38(067)3602359, e-mail: o.v.kosiak@nuwm.edu.ua, ORCID ID: 0000-0003-0653-3994.

<sup>4</sup> Кафедра строительных и дорожных машин (СДМ), Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет (ХНАДУ), ул. Ярослава Мудрого, 25, г. Харьков, Украина, 61002, тел. +38(067)2885687, e-mail: alef@khadi.kharkov.ua, ORCID ID: 0000-0002-7853-3005.

<sup>5</sup> Учебно-научный механический институт (УНМИ), Национальный университет водного хозяйства и природопользования (НУВХП), ул. Соборная, 11, г. Ровно, Украина, 33028, e-mail: yanchyk\_m15@nuwm.edu.ua, ORCID ID: 0000-0001-5209-7666.

**Аннотация. Постановка проблемы.** Рытье траншей одноковшовыми и многоковшовыми экскаваторами осуществляется в условиях ограничения рабочих органов боковыми вертикальными стенками. Разрушение почвы крайними боковыми резами (зубами), установленных на рабочих органах экскаваторов, осуществляется с ограничением рабочего процесса этими вертикальными стенками с одной стороны реза. Энергоемкость рабочего процесса значительно повышается при закритических значениях стружки за счет запрессовки части почвы. Поэтому расчет параметров одноковшовых и многоковшовых траншейных экскаваторов необходимо осуществлять на основе критичноглубинного резания почв. **Цель статьи.** Определим критическую глубину асимметричного заблокированного резания грунта в траншее у вертикальной стенки, ограничивающей пространство разрушения реза с одной стороны. **Выводы.** Расчетные зависимости показывают, что при уменьшении угла резания реза от  $50^\circ$  до  $20^\circ$  относительная критическая глубина асимметричного заблокированного резания ( $h_{кр1}/b_p$ ) увеличивается: для тугопластичной и полутвердой глины от 1,71 до 3,12; для полутвердого суглинка от 1,76 до 3,27; для твердого супеси от 1,78 до 3,75. Для полублокированного резания эта глубина увеличивается: для тугопластичной глины от 2,92 до 5,21; для полутвердой глины от 2,78 до 5,03; для полутвердого суглинка от 2,77 до 5,14; для твердого супеси от 2,65 до 5,45. **Научная новизна.** Получены математические модели для определения критической глубины резания для крайних боковых резов многоскребковых цепных траншейных экскаваторов, работающих в условиях асимметричного бокового резания и полублокированного резания. **Практическая ценность.** По полученным аппроксимированным математическим моделям в каждом конкретном случае, на основе данных о талых почвах, которые рекомендуют СНиП, стало возможным в зависимости от угла резания реза в пределах угла резания  $20^\circ \dots 50^\circ$  определить рациональную глубину резания для крайних боковых резов багатоскребковых цепных траншейных экскаваторов.

**Ключевые слова:** многоковшовые экскаваторы, боковые резы, рабочий процесс, резание грунта, критическая глубина

## DETERMINATION OF CRITICAL DEPTH OF CUTTING SOIL BY SIDE CUTTERS (TEETHES) OF TRENCH EXCAVATORS

KRAVETS S. V.<sup>1</sup>, *Doctor of Technical Sciences, Professor.*

LUKIANCHUK O. P.<sup>2</sup>, *Ph.D., Assoc. Prof.*

KOSIAK O. V.<sup>3</sup>, *Ph.D., senior lecturer.*

GAPONOV O. O.<sup>4</sup>, *graduate student.*

YANCHIK T. O.<sup>5</sup>, *student.*

<sup>1</sup> Department of building, road, melioration, agricultural machinery and equipment (BRMAME), National University of Water and Environmental Engineering (NUWEE), st. Soborna, 11, Rivne, Ukraine, 33028, tel. +38(097)2891589, e-mail: s.v.kravets@nuwm.edu.ua, ORCID ID: 0000-0003-4063-1942.

<sup>2</sup> Department of building, road, melioration, agricultural machinery and equipment (BRMAME), National University of Water and Environmental Engineering (NUWEE), st. Soborna, 11, Rivne, Ukraine, 33028, tel. +38(095)7906424 e-mail: o.p.lukyanchuk@nuwm.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-0892-545X.

<sup>3</sup> Department of building, road, melioration, agricultural machinery and equipment (BRMAME), National University of Water and Environmental Engineering (NUWEE), st. Soborna, 11, Rivne, Ukraine, 33028, tel. +38(067)3602359, e-mail: o.v.kosiak@nuwm.edu.ua, ORCID ID: 0000-0003-0653-3994.

<sup>4</sup> Department of Construction and Road Machines (SDM), Kharkiv National Automobile and Highway University (KhNAHU), st. Yaroslav Mudryy, 25, Kharkov, Ukraine, 61002, tel. +38(067)2885687, e-mail: alef@khadi.kharkov.ua, ORCID ID: 0000-0002-7853-3005.

<sup>5</sup> Educational and Scientific Mechanical Institute (ESMI), National University of Water and Environmental Engineering (NUWEE), st. Soborna, 11, Rivne, Ukraine, 33028, e-mail: yanchyk\_m15@nuwm.edu.ua, ORCID ID: 0000-0001-5209-7666.

**Annotation. Formulation of the problem.** Trenching with single-bucket and multi-bucket excavators is carried out under conditions of limited working bodies by lateral vertical walls. The destruction of the soil by the extreme lateral incisors (teeth)

installed on the working equipment of excavators is carried out with the restriction of the working process by these vertical walls on one side of the incisor. The energy intensity of the working process increases significantly at subcritical values of the chips due to the blocking of the part of the soil. Therefore, the calculation of parameters of single-bucket and multi-lorry trench excavators must be carried out on the basis of critical depth-cutting of soils. **Purpose of the article.** Let us determine the critical depth of the asymmetric blocked cutting of the soil in a trench at the vertical wall, limiting the space of destruction of the tool on one side. **Conclusions.** The calculated dependences show that as the cutting angle of the cutter decreases from 50° to 20°, the relative critical depth of asymmetric blocked cutting ( $h_{кр}/b_p$ ) increases: for refractory and semisolid clay, from 1,71 to 3,12; for semi-hard loam from 1,76 to 3,27; for hard sand from 1,78 to 3,75. For semi-blocked cutting, this depth increases: for refractory clay, from 2,92 to 5,21; for semi-solid clay from 2,78 to 5,03; for semi-hard loam from 2,77 to 5,14; for solid sandwiches from 2,65 to 5,45. **Scientific novelty.** The mathematical models for determining the critical depth of cutting for the extreme lateral incisors of the multi-slip chains of trench excavators, operating in conditions of asymmetric lateral cutting and semi-block cutting are obtained. **Practical value.** Based on the obtained approximated mathematical models in each particular case, based on the data on the thawing soils recommended by BNiP, it was possible, depending on the cutting angle of the cutter, within the cutting angle of 20°...50°, to determine the rational depth of cutting for the extreme lateral incisors of the multi-slip chains of trench excavators.

**Key words:** bucket excavators, side cutters, workflow, cutting of the soil, critical depth

### Постановка проблеми.

Копання траншей одноківшевыми та багатоківшевыми екскаваторами здійснюється в умовах 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. В першому випадку різець здійснює блоковане асиметричне різання, а в другому випадку – напівблоковане різання.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Відомо, що збільшення глибини різання ножа до критичної глибини  $h \leq h_{кр}$  призводить до зменшення енергоємності робочого процесу тому, що інтенсивність зростання опору різанню менша, ніж площа поперечного перерізу прорізу [2, 3, 12]. 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. В результаті 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 в умовах симетричного блокованого, напівблокованого, вільного та комбінованого (при двоярусній схемі розробки) різання, а крайні бокові різці – в умовах асиметричного блокованого або напівблокованого різання. Критичні глибини симетричного блокованого, напівблокованого та комбінованого різання визначені в літературі [1, 4...7, 9, 10, 13...15].

### Формулювання цілей і задач.

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. 1). Задача вирішується при відомих припущеннях [1, 6].

### Виклад основного матеріалу.

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

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

зовнішнього тертя ґрунту  $\varphi$  до нормалі лобової площини різця; нормальна реакція  $dN_c$  і дотичні сили  $dT_c$ ,  $dT_{\text{бок}1} \cos \delta$  і  $dT_{\text{бок}2}$  в площині зсуву ґрунту. Тоді система рівнянь рівноваги всіх сил на нормальну ( $n$ ) і дотичну ( $\tau$ ) осі до лобової площини сколювання мають наступний вигляд (1). З першого рівняння системи (1) отримуємо (2).

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

$$dN_c = -\frac{dN}{\cos \varphi} \cos(\alpha_p + \varphi + \psi) = -\frac{qb_p}{\cos \varphi \cdot \sin \alpha_p} \cos(\alpha_p + \varphi + \psi) dh, \quad (2)$$

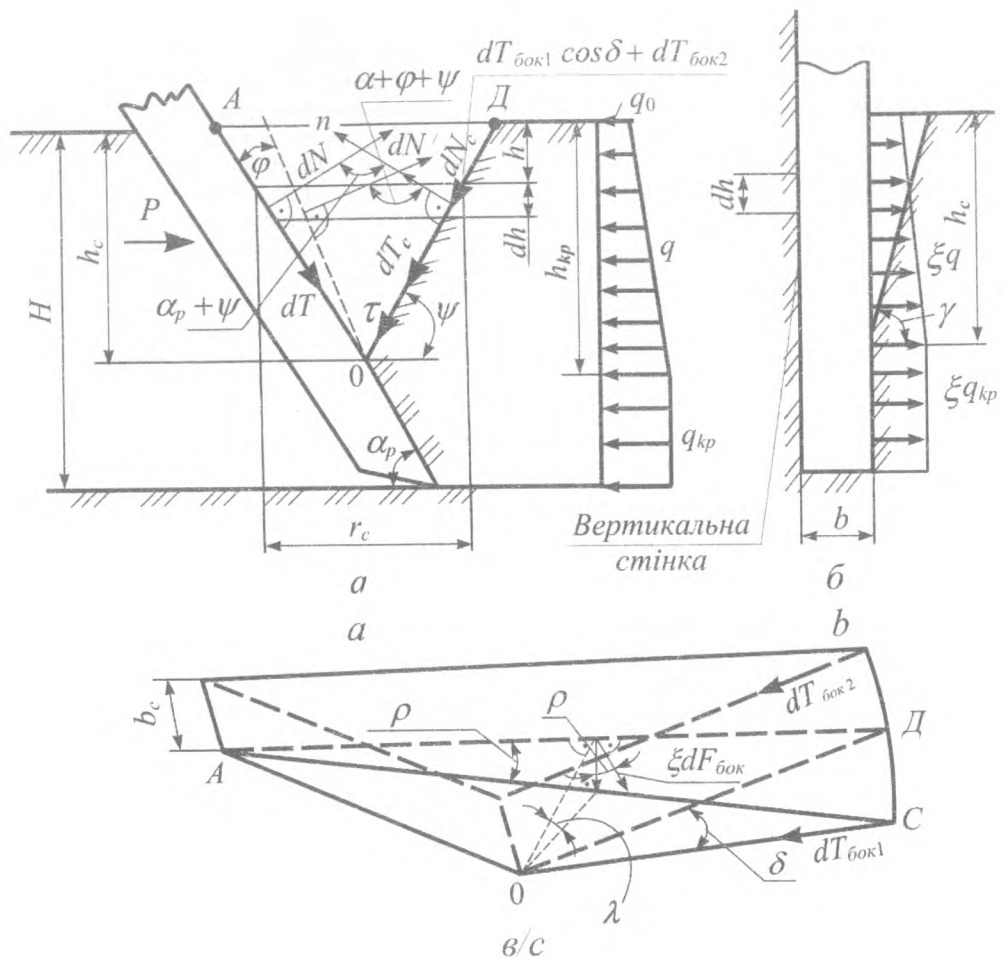


Рис. 1. Схема взаємодії крайнього бокового різця з ґрунтом при асиметричному блокованому різанні  
 Fig. 1. Scheme of interaction of an extreme lateral incisor with soil under asymmetrical blocked cutting: a) – у поздовжній площині; б) – у поперечній площині; в) – форма елемента стружки у процесі заглиблення ножа

де  $q$  – закон розподілення нормального тиску на лобову площину різця по глибині;  $b_p$  – ширина різця;  $\varphi$  – кут зовнішнього тертя ґрунту;  $\alpha_p$  – кут різання різця;  $\psi$  – кут зсуву ґрунту різцем в поздовжній площині;  $dh$  – елементарна глибина різання.

Закон розподілення нормального тиску на ніж по глибині обґрунтовано у літературі [1, 6] і представлено у вигляді

$$q = q_0 + \frac{q_{кр} - q_0}{h_c} k_{нер} h; \quad (3)$$

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

$$dT_c = \operatorname{tg} \varphi_0 dN_c + c dF_c; \quad (5)$$

$$dT_{бок1} = (\xi q \cos \rho \cos \lambda \operatorname{tg} \varphi_0 + c) dF_{бок1}; \quad (6)$$

де  $q_0$ ,  $q_{кр}$  – відповідно мінімальний тиск на денній поверхні та максимально можливий тиск по несучій спроможності ґрунту (критичний тиск) визначається по відомих залежностях [1, 6];  $k_{нер}$  – відношення глибини гарантованого сколювання ґрунту  $h_c$  до критичної глибини різання  $h_{кр}$  ( $k_{нер} = 0,9 \dots 0,95$ );  $h$  – поточне значення глибини.

З урахуванням (3) вираз (2) переписується наступним чином

$$dN_c = \frac{\cos(\alpha_p + \varphi + \psi)}{\cos \varphi \sin \alpha_p} b_p \left( q_0 + \frac{q_{кр} - q_0}{h_c} k_{нер} h \right) dh. \quad (4)$$

$$dT_{бок2} = (\xi q \operatorname{tg} \varphi_0 + c) dF_{бок2}; \quad (7)$$

де  $\varphi_0$  – кут внутрішнього тертя ґрунту;  $c$  – коефіцієнт зчеплення ґрунту;  $\xi$  – коефіцієнт бокового тиску елементарної ґрунтової стружки;  $dF_c$ ,  $dF_{бок1}$ ,  $dF_{бок2}$  – елементарні площі відповідно лобової і бокових площин сколювання;  $\rho$ ,  $\delta$ ,  $\lambda$  – кути що утворюються боковою площиною сколювання з паралельною

вертикальній боковій стінці траншеї площиною (див. рис. 1, в). При цьому елементарні площі відповідно дорівнюють:

$$dF_c = (b_p + \rho r_c) \frac{dh}{\sin \psi} = \left[ b_p + \rho (\operatorname{ctg} \alpha_p + \operatorname{ctg} \psi) (h_c - h) \right] \frac{dh}{\sin \psi}; \quad (8)$$

$$dF_{\text{бок1}} = r_c \frac{dh}{\cos \lambda} = (\operatorname{ctg} \alpha_p + \operatorname{ctg} \psi) (h_c - h) \frac{dh}{\cos \alpha}; \quad (9)$$

$$dF_{\text{бок2}} = r_c \cdot dh = (\operatorname{ctg} \alpha_p + \operatorname{ctg} \psi) (h_c - h) dh, \quad (10)$$

де  $r_c$  – поточне значення радіуса сколювання ґрунту.

Якщо підставити вирази (5...7) в друге рівняння системи (1) з урахуванням залежностей (4), (8...10) і

проінтегрувати його в межах від 0 до  $h_c$ , то після проміжних алгебраїчно-тригонометричних перетворень отримаємо рівняння:

$$\frac{\operatorname{ctg} \alpha_p + \operatorname{ctg} \psi}{2} \left\{ \left[ \frac{c \rho}{\sin \psi} + c \left( 1 + \frac{\cos \delta}{\cos \lambda} \right) \right] + \xi \left( q_0 + \frac{q_{кр} - q_0}{3} k_{неп} \right) \cos \rho \cos \delta \cdot \operatorname{tg} \varphi_0 + \xi \operatorname{tg} \varphi_0 \right\} h_c = \\ = \left[ \left( q_0 + \frac{q_{кр} - q_0}{2} k_{неп} \right) \frac{\sin(\alpha_p + \varphi + \varphi_0 + \psi)}{\cos \varphi \cos \varphi_0 \sin \alpha_p} - \frac{c}{\sin \psi} \right] b_p. \quad (11)$$

Звідки

$$h_{кр} = \frac{h_c}{k_{неп}} = \frac{\left( q_0 + \frac{q_{кр} - q_0}{2} k_{неп} \right) \frac{\sin(\alpha_p + \varphi + \varphi_0 + \psi)}{\cos \varphi \cos \varphi_0 \sin \alpha_p} - \frac{c}{\sin \psi}}{\frac{\operatorname{ctg} \alpha_p + \operatorname{ctg} \psi}{2} k_{неп} \left[ c \left( 1 + \frac{\rho}{\sin \psi} + \frac{\cos \delta}{\cos \lambda} \right) + \xi \left( q_0 + \frac{q_{кр} - q_0}{3} k_{неп} \right) \operatorname{tg} \varphi_0 (1 + \cos \rho \cos \delta) \right]}. \quad (12)$$

Кути  $\rho$ ,  $\delta$ ,  $\lambda$  визначаються із геометричних співвідношень (див. рис. 1, в) за (13...15) [1, 6].

Кут нахилу бокової площини елемента стружки до горизонту  $\gamma$  визначається за залежністю (16) [8, 11]:

$$\cos \rho = \sqrt{1 - \left( \frac{\operatorname{ctg} \gamma}{\operatorname{ctg} \alpha_p + \operatorname{ctg} \psi} \right)^2}; \quad (13)$$

$$\cos \lambda = \frac{1}{\sqrt{1 + \left( \frac{\operatorname{ctg} \alpha_p \operatorname{ctg} \gamma}{\operatorname{ctg} \alpha_p + \operatorname{ctg} \psi} \right)^2}} \quad (14)$$

$$\cos \delta = 1 - 2(\operatorname{ctg} \alpha_p + \operatorname{ctg} \psi)^2 \sin^2 \psi \sin^2 \frac{\rho}{2}; \quad (15)$$

$$\gamma = \arccos \left[ \frac{c \cdot \cos \varphi_0}{\left( 1 - 0,74 \operatorname{tg} \varphi_0 - \frac{1,52 \cdot c}{q_{кр}} \right) q_{сер}} \right] - \varphi_0 \quad (16)$$

$$q_{сер} = \frac{q_0 + q_{кр}}{2}. \quad (17)$$

Математична модель (12) 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 в умовах асиметричного блокового різання: з однієї сторони різець обмежений вертикальною боковою стінкою траншеї, з іншої сторони – масивом ґрунту, що руйнується і виходить на денну поверхню. В результаті утворюється проріз з одностороннім боковим розвалом зі сторони денної поверхні ( $\rho > 0$ ), а з іншої сторони з вертикальною стінкою ( $\rho = 0$ ) (див. рис. 1). Зі сторони бокового розвалу ґрунт руйнується переважно за рахунок деформації відриву [2, 12], а тому на боковій площині елемента стружки з розвалом відсутні бічний тиск і сили тертя ( $\xi q = 0$ ). 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 ( $\xi q \operatorname{tg} \varphi_0 > 0$ ). При цьому верхній різець створює вільний простір з 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 (12) для визначення критичних глибин асиметричного

блокованого різання у верхньому і наступних нижніх ярусах переписується наступним чином

$$h_{кр1} = \frac{\left( q_0 + \frac{q_{кр} - q_0}{2} k_{неп} \right) \frac{\sin(\alpha_p + \varphi + \varphi_0 + \psi)}{\cos \varphi \cos \varphi_0 \sin \alpha_p} - \frac{c}{\sin \psi}}{\frac{\operatorname{ctg} \alpha_p + \operatorname{ctg} \psi}{2} k_{неп} \left[ c \left( 1 + \frac{\rho}{\sin \psi} + \frac{\cos \delta}{\cos \lambda} \right) + \xi \left( q_0 + \frac{q_{кр} - q_0}{3} k_{неп} \right) \operatorname{tg} \varphi_0 \right]} b_p \quad (18)$$

$$h_{кр2} = \frac{\left( q_0 + \frac{q_{кр} - q_0}{2} k_{неп} \right) \frac{\sin(\alpha_p + \varphi + \varphi_0 + \psi)}{\cos \varphi \cos \varphi_0 \sin \alpha_p} - \frac{c}{\sin \psi}}{(\operatorname{ctg} \alpha_p + \operatorname{ctg} \psi) k_{неп} \left[ c + \xi \left( q_0 + \frac{q_{кр} - q_0}{3} k_{неп} \right) \operatorname{tg} \varphi_0 \right]} b_p \quad (19)$$

Залежність (19) ідентична залежності для визначення критичної глибини різання в нижніх ярусах, що приведена в літературі [1, 6]. Це підтверджує достовірність математичної моделі (12).

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

$$h_{кр1\text{набл}} = \frac{\left( q_0 + \frac{q_{кр} - q_0}{2} k_{неп} \right) \frac{\sin(\alpha_p + \varphi + \varphi_0 + \psi)}{\cos \varphi \cos \varphi_0 \sin \alpha_p} - \frac{c}{\sin \psi}}{\frac{\operatorname{ctg} \alpha_p + \operatorname{ctg} \psi}{2} k_{неп} \left[ c + \xi \left( q_0 + \frac{q_{кр} - q_0}{3} k_{неп} \right) \operatorname{tg} \varphi_0 \right]} b_p \quad (20)$$

Порівнявши залежності (19) і (20), 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  $\psi = \pi/2$ .

У залежностях (18), (19) і (20) невідомим є параметр  $\psi$ . Він визначається на основі припущення, що кожний раз для  $h_p \geq h_{кр}$  значення кута сколювання  $\psi$  встановлюється таким, що опір різанню ножа буде мінімальним [1, 6]. Мінімальний опір різанню (при заданій глибині різання  $h_p \geq h_{кр}$ ) ножа можливий при мінімальній площі епюри нормального тиску, а це буде, якщо  $h_{кр} = h_c / k_{неп} = \max$  і  $h_c = \max$ . Таким чином, кут зсуву ґрунту визначається максимальним значенням глибини сколювання [1, 4, 6, 8...10, 13...15].

Залежності відносної критичної глибини різання у верхньому ярусі від кута зсуву ґрунтів приведені на рис. 2, 3, а від кута різання різця – на рис. 4.

Розрахункові залежності показують, що при зменшенні кута різання різця від  $50^\circ$  до  $20^\circ$  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 сугінку 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 сугінку від 2,65 до 5,45. Математичні моделі (18), (20) є громіздкими та незручними для вираховування критичної глибини різання. З метою її спрощення проведена апроксимація в межах кута різання різця  $\alpha_p = 20^\circ \dots 50^\circ$ . Помилка апроксимації не перевищує 3,4%. У результаті отримана лінійна спадна залежність

$$\frac{h_{кр1}}{b'_p} = a' - n' \cdot \alpha_p \quad (21)$$

де  $a'$  та  $n'$  – коефіцієнти апроксимації, що залежать від типу ґрунту та різання;  $\alpha_p$  – кут різання різця в градусах.

Значення коефіцієнтів апроксимації для бокових різців приведені в таблиці.

Отримані математичні моделі (18), (20) і (21) дозволяють у кожному конкретному випадку на основі вихідних даних про талі ґрунти, рекомендовані БНІП, у залежності від кута різання різця в межах кута різання  $20^\circ \dots 50^\circ$  визначити критичну глибину різання для крайніх бокових різців багатоскребкових ланцюгових траншейних екскаваторів.

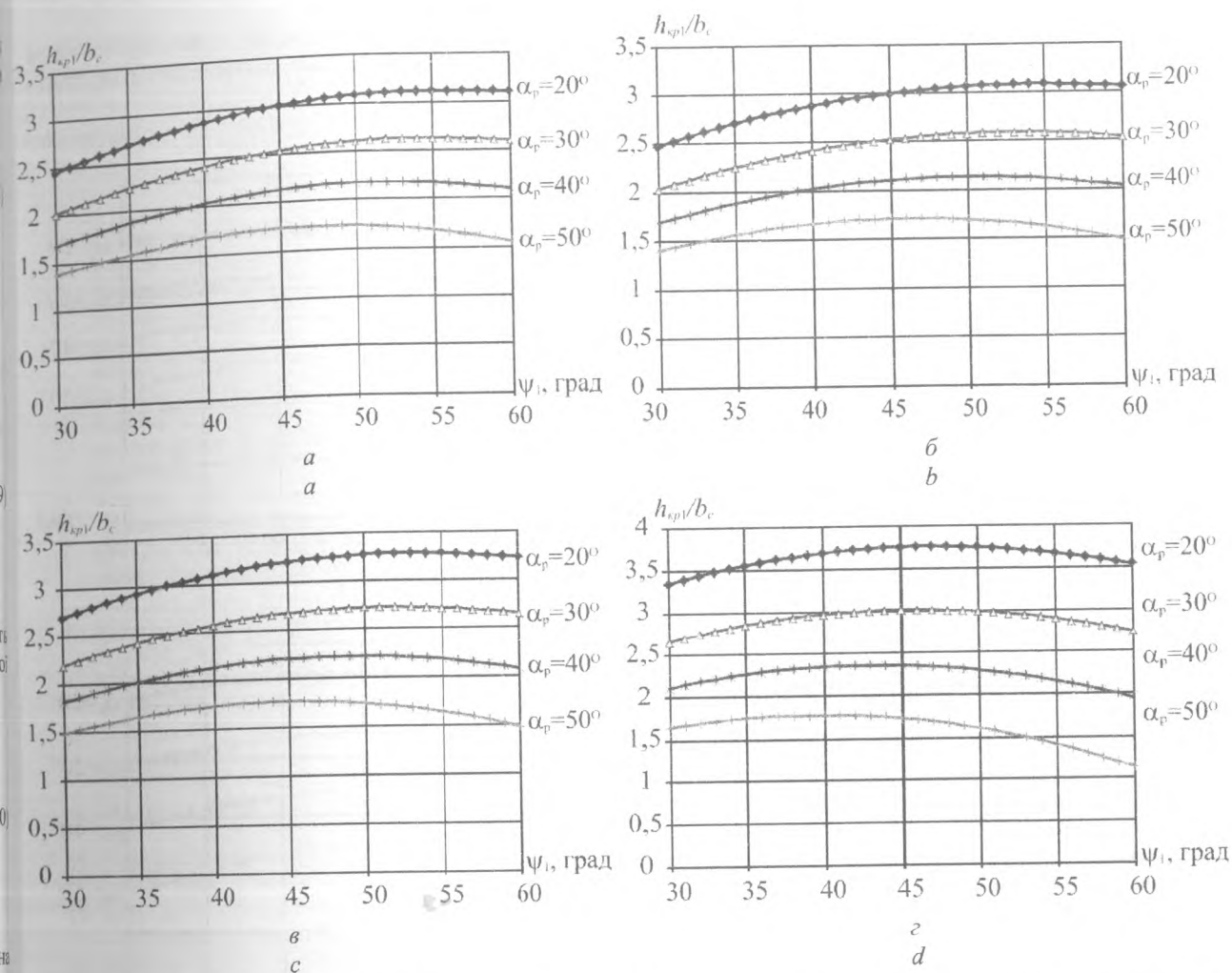


Рис. 2. Залежність відносної критичної глибини асиметричного блокованого різання боковими різцями від кута зсуву ґрунтів

Fig. 2. Dependence of relative critical depth of asymmetric blocked cutting by lateral incisors on the angle of landslide: а) – тугопластична глина; б) – напівтверда глина; в) – напівтвердий суглинок; г) – твердий супісок

Таблиця 1

**Значення коефіцієнтів апроксимації для бокових різців**

Table 1.

**Value of approximation coefficients for lateral incisors**

Тип різання Тип ґрунту	Асиметричне блоковане		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

**Висновки.**

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

Критична глибина напівблокованого різання крайніми боковими різцями у верхньому ярусі в 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 суглинка  $h_{кр1}/b_p= 1,76 \dots 3,27$ ;  $2,77 \dots 5,14$ ; для твердого

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

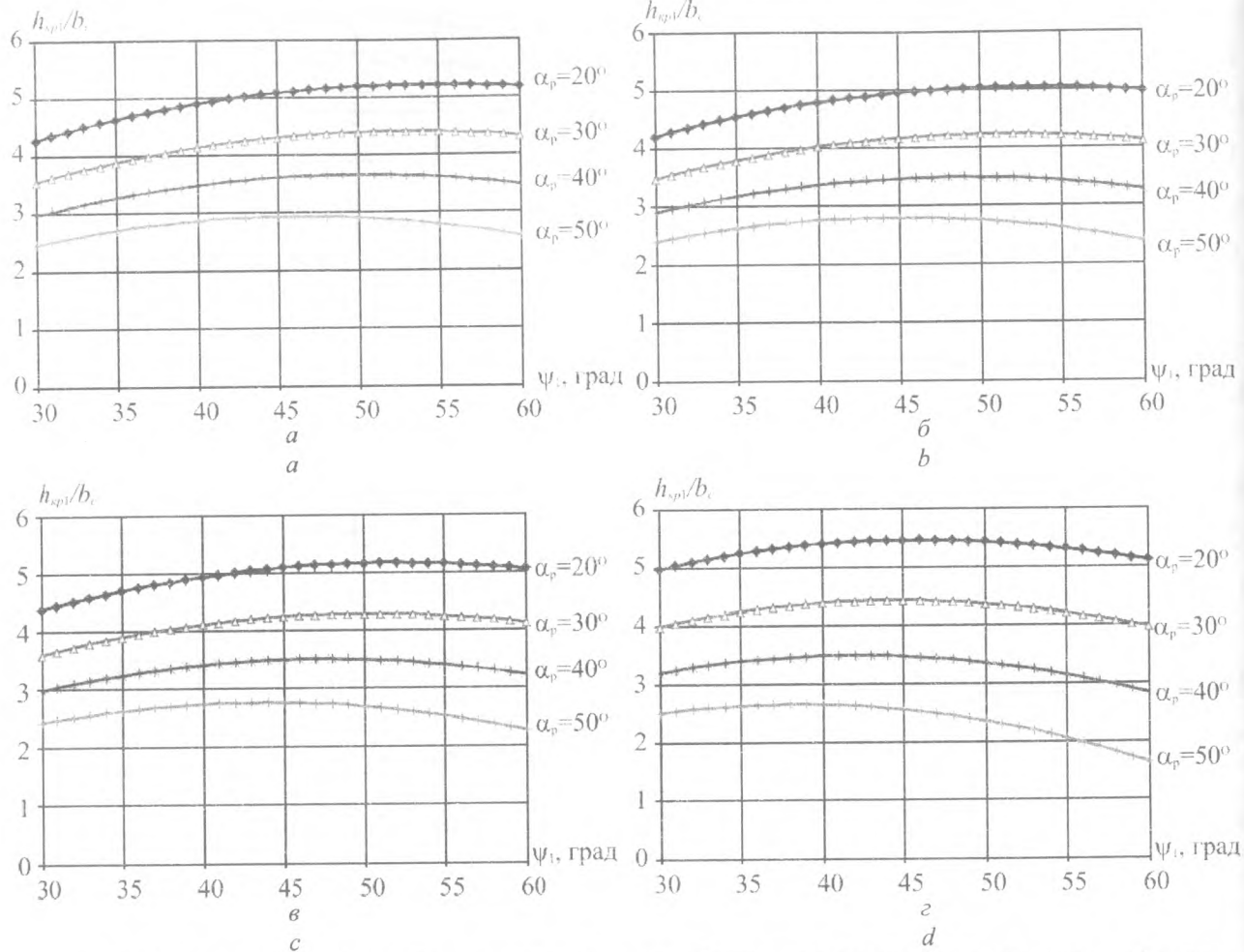


Рис. 3. Залежність відносної критичної глибини напівблокованого різання боковими різцями від кута зсуву

Fig. 3. Dependence of relative critical depth of half blocked cutting with lateral incisors from the angle of landslide: а) – тугопластична глина; б) – напівтверда глина; в) – напівтвердий суглинок; г) – твердий супісок

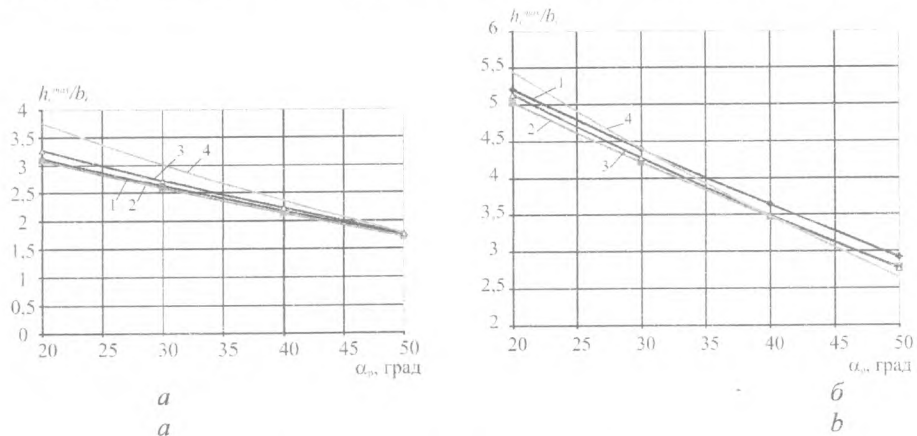


Рис. 4. Залежності відносної критичної глибини різання ґрунтів від кута різання бокових різців /

Fig. 4. Dependences of relative critical depth of cutting of soils from the angle of cutting of lateral incisors: а) – для асиметричного блокованого різання; б) – для напівблокованого різання; 1 – тугопластична глина; 2 – напівтверда глина; 3 – напівтвердий суглинок; 4 – твердий супісок



Математичні моделі відносно критичної глибини асиметричного блокового та напівблокового різання для крайніх бокових різців багатоскребкових ланцюгових траншейних екскаваторів

апроксимуються (помилка апроксимації не перевищує 3,4%) лінійною залежністю від кута різання.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Артемьев К. А. Теория резания грунтов землеройно-транспортными машинами. – Омск: ОмПИ, 1989. – 80 с.
2. Ветров А.Ю. Резание грунтов землеройными машинами. – М.: Машиностроение, 1972, –359 с;
3. Дорожные машины. ч. I. Машины для земляных работ/ Т.В. Алексеева, К.А. Артемьев, А.А. Бромберг и др. –М.: Машиностроение, 1972. – 504с.
4. 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 Nr 4.38 Seria: Transport pod redakcja naukowa Kazemierza Lejdy. – Rzeszów (Polska) : Politechnika Rzeszowska, 2015. – S. 263–268.
5. Кравець С.В., Кирикович В.Д., Блажівський В.С. Визначення критичної глибини різання при напівблокованому різанні ґрунту. Вісник Націон. ун-ту водного госп. та природокористування.: зб. наук. праць. – Рівне: НУВГП, 2007, вип. 3(ч.2), с.220–225.
6. Кравець С.В., Кованько В.В., Лук'яничук О.П. Наукові основи створення землерийно-ярусних машин і підземнорухомих пристроїв: монографія. – Рівне : НУВГП, 2015. –322 с.
7. 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», вып. 72, – Дн-ск: ПГАСА, 2013, с.128–137.
8. Критичноглибинні двоярусні ґрунторозпушувачі: монографія / С.В.Кравець та ін.; за заг. ред. С.В. Кравця. – Рівне : НУВГП, 2018. – 235 с. ISBN 978-966-327-384-6
9. Математическое моделирование рабочих процессов дорожных и строительных машин: имитационные и адаптивные модели: монография / А. М. Завьялов и др. – Омск: СибАДИ, 2012. – 411 с.
10. Мусійко В. Д. Масштабні ефекти при фізичному моделюванні процесів різання ґрунтів // Вісник Національного університету водного господарства та природокористування. Збірник наукових праць. Технічні науки. – Рівне : НУВГП, 2015. – Вип. 2 (70). – С. 112–119.
11. Мусійко В.Д. Фізико-математичне моделювання робочих процесів землерийних машин безперервної дії // Вісник НГУ. – К., 2015. – Вип. 1 (31). – С. 385–394.
12. Станевский В.П. Совершенствование рабочего процесса землеройных машин. – К.: Вища школа. Изд-во при КГУ, 1984. – 128с.
13. Andresen L. and Jostad H.P. "A constitutive model for anisotropic and strain-softening clay." Proc. Num. Mod. in Geomech. – NUMOG VIII, Rome, Italy, 2002. pp. 79-84.
14. Hashash, Y.M.A. and Whittle, A.J. "Mechanism of load transfer and arching for brand excavations in clay." J. of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 128, 3, 2002, pp. 187-197.
15. Karlsrud, Kjell and Andresen, Lars, "Design and Performance of Deep Excavations in Sof Clays". International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering. 9. 2008.

### REFERENCES

1. Artem'yev K. A. *Teoriya rezaniya gruntov zemleroyno-transportnymi mashinami* [Theory of soil cutting by earth-moving machines]. – Omsk: OmPI, 1989. – 80 s. (in Russian).
2. Vetrov A.Yu. *Rezaniye gruntov zemleroynymi mashinami*. [Soil cutting by earth moving machines] – M.: Mashinostroyeniye, 1972, –359 p; (in Russian).
3. *Dorozhnyie mashyny. ch. I. Mashyny dlia zemlianihkh rabot* [Road machines. Machines for earthmovings]/ T.V. Alekseeva, K.A. Artemev, A.A. Bromberh y dr. –M.: Mashynostroyeniye, 1972. – 504 p. (in Russian).
4. Koval' A.B., Musiyko V.D., Leychenko YU.B. *Osnovy syntezy komponoval'noyi skhemy universal'nykh zemle-ryunnykh mashyn bezperervnoyi diyi* [Fundamentals of the synthesis of the layout scheme of universal ground-breaking machines of continuous action] // Systemy i srodki transportu samochodowego. Wubrane zagadnienie. Monografia Nr 4.38 Seria: Transport pod redakcja naukowa Kazemierza Lejdy. – Rzeszów (Polska) : Politechnika Rzeszowska, 2015. – S. 263–268. (in Poland).
5. Kravets S.V., Kyrykovych V.D., Blazhiyevskyy V.S. *Vyznachennya krytychnoyi hlybyny rizannya pry napivb-lokovanomu rizanni gruntu*. [Determination of the critical depth of cut in semi-blocked soil cutting] Visnyk Natsion. un-tu vodnoho hosp. ta pryrodokorystuvannya.: zb. nauk. prats. – Rivne: NUVHP, 2007, vyp. 3(ch.2), pp.220–225. (in Ukrainian).
6. Kravets S.V., Kovanko V.V., Lukyanchuk O.P. *Naukovi osnovy stvorennia zemleryino-yarusnykh mashyn i pidzemnorukhomykh prystroiv*: monohrafiia. [Scientific basis for the creation of earth-tiered cars and underground moving devices: a monograph] – Rivne : NUVHP, 2015. – 322 p. (in Ukrainian).
7. Kravets S.V., Stin'o O.V. *Vyznachennya krytychnoyi hlybyny rizannya pry kombinovanomu poyarusnomu ruynuvanni hruntu*. [Determination of the critical depth of cut in the combined flat-layered destruction of the soi] Stroitel'stvo. Materialovedeniye. Mashinostroyeniye. «Intensifikatsiya. rab. prots. stroit. i dor. mashin», vyp. 72, – Dn-sk: PGASA, 2013, pp.128–137. (in Ukrainian).
8. *Krytychnohlybynni dvoyarusni hruntorozpushuvachi*: monohrafiya [Critical deep two tier soil rippers]/ S.V.Kravets' ta in.; za zah. red. S.V. Kravtsya. – Rivne : NUVHP, 2018. – 235 p. ISBN 978-966-327-384-6. (in Ukrainian).

9. *Matematicheskoye modelirovaniye rabochnykh protsessov dorozhnykh i stroitel'nykh mashin: imitatsionnyye i adaptivnyye modeli* [Mathematical modeling of work processes of road and construction machines: imitation and adaptive models]; monografiya / A. M. Zav'yalov i dr. – Omsk: SibADI, 2012. – 411 p. (in Russian).
10. Musiyko V. D. *Masshtabni efekty pry fizychnomu modelyuvanni protsesiv rizannya gruntiv* [Large-scale effects in the physical modeling of soil-cutting processes] // *Visnyk Natsio-nal'noho universytetu vodnoho hospodarstva ta pryrodokorystuvannya. Zbirnyk naukovykh prats'. Tekhnichni nauky.* – Rivne : NUVHP, 2015. – Vyp. 2 (70). – pp. 112–119. (in Ukrainian).
11. Musiyko V.D. *Fizyko-matematychne modelyuvannya robochnykh protsesiv zemleryynykh mashyn bezperervnoyi diyi* [Physical-mathematical modeling of work processes of earthmoving machines of continuous action] // *Visnyk NTU.* – K., 2015. – Vyp. 1 (31). – pp. 385–394. (in Ukrainian).
12. Stanevskiy V.P. *Sovershenstvovanye robocheho protsessa zemleroinikh mashyn* [Perfection of the working process of digging machines]. – K.: Vyshcha shkola. Yzd-vo pry KHU, 1984. – 128 p.
13. Andresen L. and Jostad H.P. "A constitutive model for anisotropic and strain-softening clay." *Proc. Num. Mod. in Geomech.* – NUMOG VIII, Rome, Italy, 2002. pp. 79-84.
14. Hashash, Y.M.A. and Whittle, A.J. "Mechanism of load transfer and arching for brand excavations in clay." *J. of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 128, 3, 2002, pp. 187-197.
15. Karlsrud, Kjell and Andresen, Lars, "Design and Performance of Deep Excavations in Sof Clays". *International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering*. 9. 2008.