

УДК 624.132.002.51.001.24

## АНАЛІЗ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ВПЛИВУ ШВИДКОСТІ НА ПРОЦЕС ГЛИБОКОГО РІЗАННЯ ҐРУНТІВ

КРАВЕЦЬ С.В.<sup>1</sup>, *д. т. н., проф.*  
ЛУК'ЯНЧУК О.П.<sup>2</sup>, *к. т. н., доц.*

<sup>1</sup> Кафедра будівельних, дорожніх, меліоративних, сільськогосподарських машин та обладнання (БДМСМіО), Національний університет водного господарства та природокористування (НУВГП), вул. Новака, 77, навчальний корпус №3, 33000, м. Рівне, Україна, 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. Новака, 77, навчальний корпус №3, 33000, м. Рівне, Україна, e-mail: o.p.lukyanchuk@nuwm.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-0892-545X.

**Анотація. Постановка проблеми.** Процес глибокої розробки ґрунтів пасивно-ножевими робочими органами характеризується критичною глибиною різання, просторовою взаємодією робочого інструменту з середовищем, утворенням ядер ущільнення, законами розподілу нормального тиску середовища на робочий інструмент і перехідною зоною утворення стружки. Одним із шляхів вдосконалення пасивних робочих органів є оптимізація їх форми і параметрів на основі врахування фізичної суті процесу за складними теоретичними залежностями. **Мета статті.** Існує необхідність спрощення існуючих складних теоретичних залежностей для визначення відносної глибини сколювання для різних умов різання верхньому та нижніх ярусах з врахуванням швидкості. **Висновки.** Для найбільш представницьких ґрунтів враховуючи вплив зміни кута різання в межах докритичних швидкостей розрахунок величини відносного сколу ґрунту з допустимою похибкою можна проводити за спрощеними моделями нехтуючи перехідною зоною і тисками на денній поверхні кожного ярусу та тиску від зростання швидкості. Виключенням є розрахунок для верхнього ярусу на супіщаних ґрунтах при куті різання більше 30°.

**Ключові слова:** робочий процес, глибоке різання, ґрунт, критична швидкість, кут різання, математична модель відхилення

## АНАЛИЗ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ВЛИЯНИЯ СКОРОСТИ НА ПРОЦЕСС ГЛУБОКОГО РЕЗАНИЯ ПОЧВ

КРАВЕЦ С.В.<sup>1</sup>, *д. т. н., проф.*  
ЛУК'ЯНЧУК А.П.<sup>2</sup>, *к. т. н., доц.*

<sup>1</sup> Кафедра строительных, дорожных, мелиоративных, сельскохозяйственных машин и оборудования (БДМСМіО), Национальный университет водного хозяйства и природопользования (НУВХП), ул. Новака, 77, учебный корпус №3, 33000 г. Ровно, Украина, 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 (БДМСМіО), Национальный университет водного хозяйства и природопользования (НУВХП), ул. Новака, 77, учебный корпус №3, 33000 г. Ровно, Украина, e-mail: o.p.lukyanchuk@nuwm.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-0892-545X.

**Аннотация. Постановка проблемы.** Процесс глубокой разработки ґрунтов пассивно-ножевыми рабочими органами характеризуется критической глубиной резания, пространственным взаимодействием рабочего инструмента со средой образования ядер уплотнения, законами распределения нормального давления среды на рабочий инструмент и переходной зоной образования стружки. Одним из путей совершенствования пассивных рабочих органов является оптимизация их формы и параметров на основе учета физической сути процесса по сложным теоретическим зависимостям. **Цель статьи.** Существует необходимость упрощения существующих сложных теоретических зависимостей для определения относительной глубины скальвания для различных условий резания в верхнем и нижних ярусах с учетом скорости. **Выводы.** Для самых представительных почв учитывая влияние изменения угла резания в пределах докритических скоростей расчет величины относительного скола ґрунта с допустимой погрешностью можно проводить по упрощенным моделям пренебрегая переходной зоной и давлениями на дневной поверхности каждого яруса и давления от роста скорости. Исключением является расчет для верхнего яруса на супесчаных почвах при углах резания больше 30°.

**Ключевые слова:** рабочий процесс, глубокое резание, почва, критическая скорость, угол резания, математическая модель, отклонение

## ANALYSIS OF THE MATHEMATICAL MODEL OF THE INFLUENCE OF SPEED ON THE PROCESS OF DEEP CUTTING SOIL

KRAVETS S.V.<sup>1</sup>, *Doctor of Technical Sciences, Professor*  
 LUKYANCHUK O.P.<sup>2</sup>, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*

<sup>1</sup> Department of building, road, melioration, agricultural machinery and equipment (BRMAME), National University of Water and Environmental Engineering (NUWEE), street Novak, 77, educational building number 3, 33000, Rivne, Ukraine, 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), street Novak, 77, educational building number 3, 33000, Rivne, Ukraine, e-mail: o.p.lukyanchuk@nuwm.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002 -0892-545X.

**Annotation. Formulation of the problem.** The process of deep soil development by passive knife working bodies is characterized by the critical depth of cutting, the spatial interaction of the working tool with the medium, the formation of compaction nuclei, the laws of distribution of the normal pressure of the medium onto the working tool, and the transition zone of chip formation. One way to improve passive working bodies is to optimize their shape and parameters based on taking into account the physical essence of the process based on complex theoretical dependencies. **Purpose of the article.** There is a need to simplify the existing complex theoretical dependencies for determining the relative depth of shear for different cutting conditions in the upper and lower tiers, taking into account the speed. **Conclusions.** For the most representative soils, taking into account the effect of changing the cutting angle within the subcritical rates, calculation of the relative fracture of soil with an allowable error can be carried out using simplified models, neglecting the transition zone and pressures on the daily surface of each tier and the pressure from the growth of velocity. An exception is the calculation for the upper tier on sandy loamy soils with cutting angles greater than 30 °.

*Key words:* working process, deep cutting, soil, critical speed, cutting angle, mathematical model, deviation

**Постановка проблеми.** Процес глибокої розробки ґрунтів здійснюють безтраншейні укладачі, багаторясні розпушувачі і інші землерийні машини з пасивно-ножевими робочими органами традиційної конструкції (з суцільною різальною частиною по глибині і ширині захвату). Цей процес характеризується критичною глибиною різання, просторовою взаємодією робочого інструменту з

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** На сьогодні відомо, що найменша енергоємність забезпечується при розробці ґрунту ґрунторозробним органом на критичну глибину, тому перш за все, необхідно знати її величину в залежності від умов різання (верхній, нижній ярус) і вихідних даних найбільш ймовірних типів талих ґрунтів.

До цього часу впливом швидкості різання і силою тяжіння ґрунту, при визначенні критичної глибини та опору руйнування ґрунту нехтували, так як згідно аналізу літературних джерел при малих величинах швидкості (до 2 м/с) сила різання практично не залежить від швидкості. Збільшення швидкості більше 2 м/с викликає значний ріст опору руйнування ґрунту [4].

При різанні ґрунту енергія затрачується на деформацію відділеного шару і примикаючих до нього частин, а також на подолання сил інерції відділених частин і кусків. Ці процеси протікають взаємопов'язано між собою. Зі збільшенням

середовищем, утворенням ядер ущільнення, законами розподілу нормального тиску середовища на робочий інструмент і перехідною зоною утворення стружки [1]. А тому одним із шляхів вдосконалення пасивних робочих органів є оптимізація їх форми і параметрів на основі вивчення і врахування фізичної суті процесу глибокої розробки ґрунтів [2, 3].

швидкості зростає лобовий тиск, створюючи додаткове навантаження під дією якого сповільнюється деформування ґрунту, яке не встигає в повній мірі відбутися, що викликає ріст опору його руйнування [5, с. 51].

**Формулювання цілей і задач.** За результатами аналізу геометричних, кінематичних і силових показників, які визначають фізичні особливості процесу глибокого руйнування ґрунту, було встановлено залежність (1) для закону розподілу тиску ґрунту на різальний інструмент (ніж) по глибині з врахуванням швидкості [5, с. 53-54], де  $q_0$ ,  $q_{kp}$  – мінімальний та критичний тиск ґрунту на ніж;  $b_c$ ,  $h$  – ширина і глибина різання  $h_{kp}$  – критична глибина;  $\varphi$  – кут зовнішнього тертя ґрунту;  $v$  – швидкість робочого органу;  $\alpha_p$  – кут різання;  $\gamma$  – кут бічного сколювання ґрунту у вертикальній площині;  $\psi$  – кут сколювання ґрунту у вертикальній площині;  $v_{kp}$  – критична швидкість різання.

$$q(h, v) = \left(1 + \frac{v}{v_{kp}}\right) \left[ q_0 + \frac{q_{kp} - q_0}{h_{kp}} \cdot h + \gamma_{zp} \left(1 + \frac{h}{b_c} \operatorname{ctg} \gamma\right) \cdot \frac{\cos \psi \cdot \cos \varphi \cdot \sin^2 \alpha_p}{\sin(\alpha_p + \psi) \cdot \sin(\alpha_p + \varphi)} \cdot v^2 \right] \quad (1)$$

На елементарний об'єм елемента стружки висотою  $dh$  в момент попередній сколюванню діють наступні сили, які приведені у вертикальну площину

ОАД (рис. 1): активна сила  $dN' = \frac{dN}{\cos \varphi}$ , яка

направлена під кутом зовнішнього тертя ґрунту  $\varphi$  до нормалі лобової площини ножа; нормальна реакція

$dN_c$  і дотичні сили  $dT_c$  і  $2dT_{бок} \cos \delta$  в площині зсуву ґрунту [5, с. 54].

Після впровадження даного закону в методику розрахунку і виконавши математичні перетворення було отримано залежності (2), (3) для визначення відносної глибини сколювання для різних умов різання у верхньому ( $h_{c1}/b_c$ ) та нижніх

( $h_{c2}/b_c$ ) ярусах з врахуванням швидкості, де  $\lambda$ ,  $\rho$ ,  $\delta$  кути, які утворюються боковою площиною сколювання з вертикальною площиною;  $k_{пер}$  – коефіцієнт перехідної зони;  $\xi$  – коефіцієнт бічного розширення;  $\varphi_0$  – кут внутрішнього тертя ґрунту [с. 54].

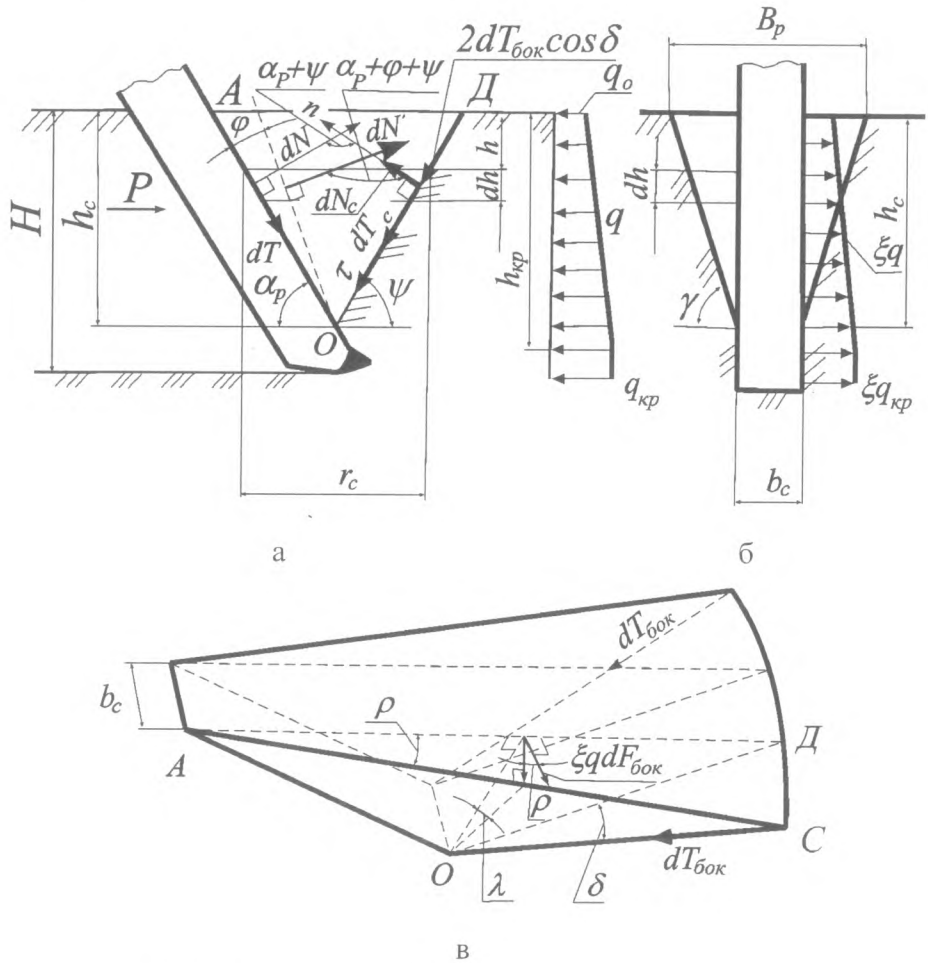


Рис. 1. Схема взаємодії ножа з ґрунтовим середовищем: А – у поздовжній площині; б – у поперечній площині; в – форма елемента стружки у процесі заглиблення ножа

$$\frac{h_{c1}}{b_c} = \frac{\left(1 + \frac{v}{v_{кр}}\right) \left[ q_0 + \frac{q_{кр} - q_0}{2} \cdot k_{пер} + q_v \right] \frac{\sin(\alpha_p + \varphi + \varphi_0 + \psi)}{\cos \varphi \cdot \cos \varphi_0 \cdot \sin \alpha_p} \frac{c}{\sin \psi}}{c \cdot (\operatorname{ctg} \alpha_p + \operatorname{ctg} \psi) \cdot \left( \frac{\rho}{\sin \psi} + \frac{\cos \delta}{\cos \lambda} \right) - \left(1 + \frac{v}{v_{кр}}\right) \cdot q_v \cdot \frac{\operatorname{ctg} \gamma}{2} \frac{\sin(\alpha_p + \varphi + \varphi_0 + \psi)}{\cos \varphi \cdot \cos \varphi_0 \cdot \sin \alpha_p}}; \quad (2)$$

$$\frac{h_{c2}}{b_c} = \frac{\left(1 + \frac{v}{v_{кр}}\right) \left[ q_0 + \frac{q_{кр} - q_0}{2} \cdot k_{неп} + q_v \right] \cdot \frac{\sin(\alpha_p + \varphi + \varphi_0 + \psi)}{\cos \varphi \cdot \cos \varphi_0 \cdot \sin \alpha_p} - \frac{c}{\sin \psi}}{\left( \text{ctg} \alpha_p + \text{ctg} \psi \right) \left[ \left(1 + \frac{v}{v_{кр}}\right) \cdot \xi \left( q_0 + \frac{q_{кр} + q_0}{3} \cdot k_{неп} + q_v \right) \cdot \text{tg} \varphi_0 + c \right]}, \quad (3)$$

де  $q_v = \frac{\gamma_{зр} \cdot \cos \psi \cdot \cos \varphi \cdot \sin^2 \alpha_p}{g \cdot \sin(\alpha_p + \psi) \cdot \sin(\alpha_p + \varphi)} \cdot v^2$ .

Отримано також лінійні апроксимаційні залежності для трьох представницьких ґрунтів: супіску твердого, напівтвердого суглинку та тугопластичної глини, але вони не дають змоги в повній мірі врахувати умови глибокого різання, так як залежать тільки від одного параметра – кута різання. Існує необхідність спрощення складних теоретичних залежностей.

**Виклад основного матеріалу.** Для спрощення теоретичних залежностей визначено вагомість складових частин моделей та можливий діапазон зміни їх величин для найбільш представницьких ґрунтів. В ролі складових частин бралися множники чисельника і знаменника моделі.

Для визначення вагомості використовувалась відповідна функція табличного процесора Microsoft Excel. Коефіцієнти кореляції для всіх множників лежать в межах 0,96-1,0, тобто всі вони є вагомими і нехтувати ними з цих міркувань недоцільно.

Провівши аналіз можливих діапазонів зміни величин моделі для найбільш представницьких ґрунтів (тугопластичної глини, напівтвердого суглинку та твердого супіску), визначено, що для швидкостей до 6,5 м/с коефіцієнт біля  $v^2$ , є близьким до «0» і лежить в межах  $1,0 \cdot 10^{-4} \dots 4,0 \cdot 10^{-4}$ , що більше ніж на два порядки менше від інших складових теоретичних залежностей, тому можна прийняти  $q_v = 0$ .

Отже, будемо мати залежності (4), (5) – 1-ий варіант спрощення теоретичних моделей (2), (3):

$$\frac{h_{c1}}{b_c} = \frac{\left(1 + \frac{v}{v_{кр}}\right) \left[ q_0 + \frac{q_{кр} - q_0}{2} \cdot k_{неп} \right] \cdot \frac{\sin(\alpha_p + \varphi + \varphi_0 + \psi)}{\cos \varphi \cdot \cos \varphi_0 \cdot \sin \alpha_p} - \frac{c}{\sin \psi}}{c \cdot \left( \text{ctg} \alpha_p + \text{ctg} \psi \right) \left( \frac{\rho}{\sin \psi} + \frac{\cos \delta}{\cos \lambda} \right)}, \quad (4)$$

$$\frac{h_{c2}}{b_c} = \frac{\left(1 + \frac{v}{v_{кр}}\right) \left[ q_0 + \frac{q_{кр} - q_0}{2} \cdot k_{неп} \right] \cdot \frac{\sin(\alpha_p + \varphi + \varphi_0 + \psi)}{\cos \varphi \cdot \cos \varphi_0 \cdot \sin \alpha_p} - \frac{c}{\sin \psi}}{\left( \text{ctg} \alpha_p + \text{ctg} \psi \right) \left[ \left(1 + \frac{v}{v_{кр}}\right) \cdot \xi \left( q_0 + \frac{q_{кр} + q_0}{3} \cdot k_{неп} \right) \cdot \text{tg} \varphi_0 + c \right]}. \quad (5)$$

З точки зору фізики процесу одним з варіантів спрощення є нехтування перехідною зоною і мінімальним тиском на денній поверхні кожного ярусу, так як величина останнього відносно критичного тиску є досить мала. Додатковим спонуканням до цього є те, що в формулі відносно невеликий тиск на денній поверхні спочатку віднімається від критичного тиску, а потім додається,

тобто його величина приймає різні знаки і частково компенсується.

Тоді при  $q_v = 0$ ;  $q_0 = 0$ ;  $k_{неп} = 1$  будемо мати залежності (6), (7) – 2-ий варіант спрощення теоретичних моделей (2), (3):

$$\frac{h_{c1}}{b_c} = \frac{\left(1 + \frac{v}{v_{кр}}\right) \left[ \frac{q_{кр}}{2} \right] \cdot \frac{\sin(\alpha_p + \varphi + \varphi_0 + \psi)}{\cos \varphi \cdot \cos \varphi_0 \cdot \sin \alpha_p} - \frac{c}{\sin \psi}}{c \cdot \left( \text{ctg} \alpha_p + \text{ctg} \psi \right) \left( \frac{\rho}{\sin \psi} + \frac{\cos \delta}{\cos \lambda} \right)}, \quad (6)$$

$$\frac{h_{c2}}{b_c} = \frac{\left(1 + \frac{v}{v_{kp}}\right) \left[\frac{q_{kp}}{2}\right] \cdot \frac{\sin(\alpha_p + \varphi + \varphi_0 + \psi)}{\cos \varphi \cdot \cos \varphi_0 \cdot \sin \alpha_p} - \frac{c}{\sin \psi}}{\left(\operatorname{ctg} \alpha_p + \operatorname{ctg} \psi\right) \left[\left(1 + \frac{v}{v_{kp}}\right) \cdot \xi \left(\frac{q_{kp}}{3}\right) \cdot \operatorname{tg} \varphi_0 + c\right]}$$

Для того щоб оцінити реальні можливості застосування таких варіантів спрощення на практиці проведено відповідні розрахунки для найбільш представницьких ґрунтів враховуючи вплив зміни

кута різання в межах докритичних швидкостей. Після визначення поточної похибки розрахунку  $h_c/b_c$  спрощеними моделями (4)...(7), визначено граничні значення (табл. 1).

Таблиця

Значення похибки розрахунку  $h_c/b_c$  за спрощеними моделями

|                       | $\alpha_p = 20^\circ$ |                |                           |                | $\alpha_p = 30^\circ$ |                |                           |                | $\alpha_p = 40^\circ$ |                |                           |                | $\alpha_p = 50^\circ$ |                |                           |                |
|-----------------------|-----------------------|----------------|---------------------------|----------------|-----------------------|----------------|---------------------------|----------------|-----------------------|----------------|---------------------------|----------------|-----------------------|----------------|---------------------------|----------------|
|                       | $q_v=0$               |                | $q_v=0, q_0=0, k_{пер}=1$ |                | $q_v=0$               |                | $q_v=0, q_0=0, k_{пер}=1$ |                | $q_v=0$               |                | $q_v=0, q_0=0, k_{пер}=1$ |                | $q_v=0$               |                | $q_v=0, q_0=0, k_{пер}=1$ |                |
| *                     | $\Delta_1, \%$        | $\Delta_2, \%$ | $\Delta_1, \%$            | $\Delta_2, \%$ | $\Delta_1, \%$        | $\Delta_2, \%$ | $\Delta_1, \%$            | $\Delta_2, \%$ | $\Delta_1, \%$        | $\Delta_2, \%$ | $\Delta_1, \%$            | $\Delta_2, \%$ | $\Delta_1, \%$        | $\Delta_2, \%$ | $\Delta_1, \%$            | $\Delta_2, \%$ |
| Тугопластична глина   |                       |                |                           |                |                       |                |                           |                |                       |                |                           |                |                       |                |                           |                |
| min                   | 0,00                  | 0,00           | 0,44                      | 0,43           | 0,00                  | 0,00           | 0,13                      | 2,12           | 0,00                  | 0,00           | 4,13                      | 0,98           | 0,00                  | 0,00           | 7,98                      | 0,3            |
| max                   | 12,68                 | 0,43           | 10,29                     | 2,72           | 10,44                 | 0,47           | 10,54                     | 2,49           | 8,80                  | 0,52           | 12,24                     | 2,73           | 8,13                  | 0,61           | 14,70                     | 2,7            |
| Напівтвердий суглинок |                       |                |                           |                |                       |                |                           |                |                       |                |                           |                |                       |                |                           |                |
| min                   | 0,00                  | 0,00           | 0,47                      | 2,46           | 0,00                  | 0,00           | 0,08                      | 2,53           | 0,00                  | 0,00           | 3,86                      | 1,96           | 0,00                  | 0,00           | 8,14                      | 0,8            |
| max                   | 7,33                  | 0,07           | 4,71                      | 2,68           | 6,16                  | 0,10           | 6,01                      | 3,16           | 5,49                  | 0,13           | 8,86                      | 3,95           | 4,55                  | 0,19           | 11,65                     | 4,4            |
| Твердий супісок       |                       |                |                           |                |                       |                |                           |                |                       |                |                           |                |                       |                |                           |                |
| min                   | 0,00                  | 0,00           | 0,24                      | 1,78           | <b>45,22</b>          | 0,05           | <b>51,53</b>              | 1,53           | <b>38,20</b>          | 1,76           | <b>43,02</b>              | 0,65           | <b>31,28</b>          | 6,85           | <b>34,22</b>              | 4,0            |
| max                   | 7,32                  | 0,20           | 4,88                      | 2,30           | <b>82,96</b>          | 3,03           | <b>90,64</b>              | 5,16           | <b>79,70</b>          | 5,29           | <b>85,58</b>              | 2,98           | <b>75,01</b>          | 9,47           | <b>78,56</b>              | 6,7            |

\*  $\Delta_1, \%$  – похибка в верхньому ярусі,  $\Delta_2, \%$  – похибка в нижніх ярусах.

З аналізу отриманих даних видно, що з загального масиву негативно вирізняються значення для верхнього ярусу твердого супіску при кутах  $\alpha_p \geq 30^\circ$  (табл. 1, виділено напівжирним курсивом), що є неприйнятним для застосування спрощених моделей. Усі інші значення лежать в межах 0...14,7% і є прийнятними для обох варіантів спрощення, причому для малих кутів різання ( $\alpha_p \leq 30^\circ$ ) меншу похибку має другий варіант спрощення моделей, а для більших ( $\alpha_p \geq 40^\circ$ ) – перший варіант. Загалом залежність похибки розрахунку  $h_c/b_c$  від кута різання  $\alpha_p$  при зміні вхідних параметрів має різнонаправлений характер і не може якимось однозначно трактуватися для вибраних типів ґрунтів (рис. 2).

Якщо розглядати дати похибку розрахунку  $h_c/b_c$  за спрощеними моделями (4)...(7) в залежності від швидкості то можна побачити, що зміна величини похибки є характерною для всіх розглянутих варіантів ґрунтів: для верхніх ярусів залежність має зростаючий параболічний характер, а для нижніх є майже незмінною (0...5,3%) за деякими виключеннями при кутах  $\alpha_p = 50^\circ$ . Для прикладу

наведемо залежності для тугопластичної глини, та як за табл. 1 в цьому випадку похибки є найбільшими (рис. 3).

Як видно з приведених залежностей, при обох варіантах спрощення, максимальна похибка розрахунку починає значно зростати для швидкостей при досягненні значення половини критичної швидкості (1,5...3,5 м/с), а до цього лежить в межах 0...8,5%, що вказує на допустимість рівноцінного застосування обох варіантів спрощених моделей розрахунку (4), (5) і (6), (7) для реальних швидкостей робочих органів при глибокому різанні ґрунтів.

**Висновки.** Для найбільш представницьких ґрунтів враховуючи вплив зміни кута різання в межах докритичних швидкостей розрахунок величини відносного сколу ґрунту  $h_c/b_c$  з допустимим похибкою можна проводити за спрощеними моделями нехтуючи перехідною зоною і тисками на денній поверхні кожного ярусу та тиску від зростання швидкості. Виключенням є розрахунок для верхнього ярусу на супішаних ґрунтах при кутах різання  $\alpha_p \geq 30^\circ$

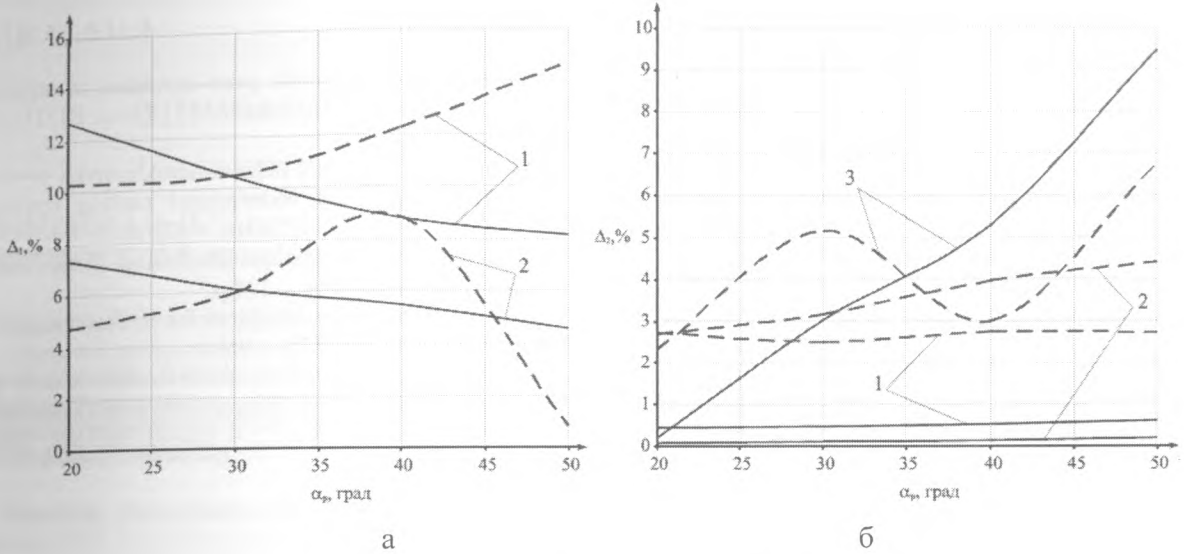


Рис. 2. Залежність похибки розрахунку  $h_c/b_c$  від кута різання:

*a* – для верхнього ярусу; *б* – для нижніх ярусів; 1 – тугопластична глина; 2 – напівтвердий суглинок; 3 – твердий супісок; суцільна лінія (—) – при  $q_v=0$ ; штрихова лінія (---) – при  $q_v=0, q_0=0, k_{пер}=1$

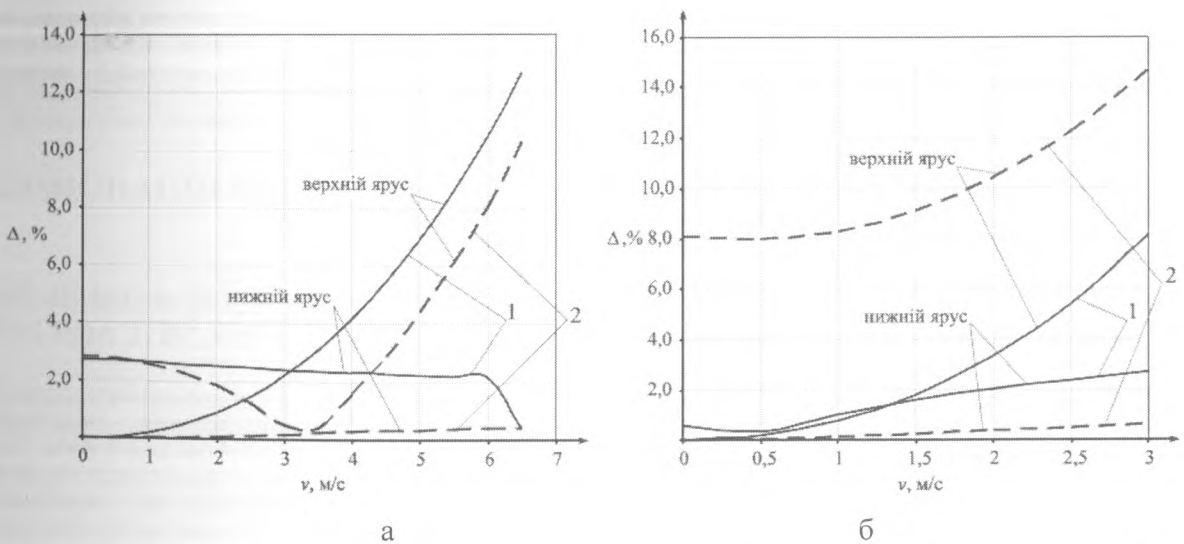


Рис. 3. Залежність похибки розрахунку  $h_c/b_c$  від швидкості руху для тугопластичної глини: *a* – при  $\alpha_p=20^\circ$ ; *б* – при  $\alpha_p=50^\circ$ ; 1 – при  $q_v=0$ ; 2 – при  $q_v=0, q_0=0, k_{пер}=1$ .

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Кравець С.В. Грунтозахисні та енергозберігаючі машини. Основи теорії, проектування та створення. – Рівне: РДТУ, 1999. – 277 с.
2. Кравець С. В. Наукові основи створення землерийно-ярусних машин і підземнорухомих пристроїв: монографія / С.В.Кравець, В.В.Кованько, О.П.Лук'янчук. – Рівне : НУВГП, 2015. – 322 с.
3. Станевский В.П. Совершенствование рабочего процесса землеройных машин. – К.: Вища школа. Изд-во при КГУ, 1984. – 128с.
4. Дорожные машины. ч. I. Машины для земляных работ/ Т.В. Алексева, К.А. Артемьев, А.А. Бромберг и др. –М.: Машиностроение, 1972. – 504с.
5. Кравець С.В., Лук'янчук О.П., Савін Р.М. Вплив швидкості на процес глибокого різання ґрунтів. Сб. науч. тр.: Строительство. Материаловедение. Машиностроение. Интенсификация раб. проц. строит. и дор. машин, вип.57. – Дн-ск: ПГАСА, 2010. – С.51...57.

## REFERENCES

1. Kravets S.V. Gruntozakhyshni ta enerhozberihaiuchi mashyny. Osnovy teorii, proe-ktivannia ta stvorenni [Soil-proof and energy-saving machines. Fundamentals of theory, design and creation]. – Rivne: RDTU, 1999. – 277 p.
2. Kravets S. V. Naukovi osnovy stvorennia zemleryino-yarusnykh mashyn i pidzem-norukhomykh prystroiv [Scientific basis for the creation of earth-tiered cars and underground moving devices: monograph]/ S.V.Kravets, V.V.Kovanko, O.P.Lukyanchuk. – Rivne : NUVHP, 2015. – 322 p.
3. Stanevskiy V.P. Sovershenstvovanye robocheho protsessa zemleroinikh mashyn [Perfection of the working process of digging machines]. – K.: Vyscha shkola. Yzd-vo pry KHU, 1984. – 128 p.
4. Dorozhnyie mashyny. ch. I. Mashyny dlia zemlianikh rabot [Road machines. Machines for earthmovings]/ T. Alekseeva, K.A. Artemev, A.A. Bromberh y dr. –M .: Mashynostroenye, 1972. – 504 p.
5. Kravets S.V., Lukyanchuk O.P., Savin R.M. Vplyv shvydkosti na protses hlybokoho rizannia hruntiv [The influence of speed on the process of deep cutting of soils]. Sb. nauch. tr.: Stroytelstvo. Materyalovedeny Mashynostroenye. Yntensyfykatsiya rab. prots. stroyt. y dor. mashyn, vyp.57. – Dn-sk: PHASA, 2010. pp.51...57.