

ВИЗНАЧЕННЯ СИЛИ НАПІВБЛОКОВАНОГО РІЗАННЯ ҐРУНТУ Й ЕНЕРГОЄМНОСТІ ДВОЯРУСНИМ ҐРУНТОРОЗПУШУВАЧЕМ

Кравець С. В.¹, Тхорук Є. І.¹, Рукавишніков Ю. В.², Степанюк Б. І.¹

¹Національний університет водного господарства та природокористування

²Харківський національний автомобільно-дорожній університет

Анотація. У статті подано аналітичний підхід до визначення закономірностей зміни нормального тиску на ніж, залежно від глибини різання за напівблокованого способу та різних кутів різання для різних типів ґрунтів. Також розглянуто залежність сили й енергоємності процесу напівблокованого різання від глибини за різних кутів різання і типів ґрунтів.

Ключові слова: напівблоковане різання, нормальний тиск, зусилля, енергоємність, статичне руйнування ґрунту.

Вступ

Проблема економії енергії та ресурсів є надзвичайно актуальною. Раціональне просторове розташування ґрунторозробних елементів землерийно-ярусного робочого органу дозволяє зменшити тяговий опір й енерговитрати під час процесів руйнування та розпушення ґрунту [1].

У роботі землерийної машини значна частка енергії витрачається на подолання зусиль, що виникають під час копання, переміщення ґрунту вздовж робочого органу та його завантаження.

Основними недоліками таких робочих органів є висока енергоємність процесу, ущільнення ґрунту в стінки нарізаних щілин, а також неповне й недостатньо якісне розпушення.

Зменшення зусилля різання в багатьох випадках можливе за незначних конструктивних змін і мінімальних матеріальних витрат завдяки зміні блокованих та асиметрично-блокованих умов взаємодії робочих органів із ґрунтом до менш енерговитратних напівблокованих і вільних.

Аналіз основних досліджень

У Національному університеті водного господарства та природокористування на кафедрі будівельних, дорожніх і меліоративних машин проводилися дослідження критичноглибинних двоярусних ґрунторозпушувачів.

Основна увага приділялася оптимальному розташуванню ґрунторозробних органів у верхньому та нижньому ярусах з метою забезпечення розпушення ґрунту на критичних

глибинах кожного ярусу за умови дотримання принципу незалежної роботи робочих органів [1–8]. Аналіз міжнародних досліджень [9–14] демонструє, що ефективність розпушення ґрунтового середовища визначається геометричними параметрами робочих органів, умовами їх взаємодії з ґрунтовым середовищем, режимами роботи, величиною тягового опору та структурою ущільненого ґрунту.

Запропоновані розрахункова схема двоярусного критичноглибинного розпушувача та методика вибору раціональних параметрів [1] не враховує напівблоковане різання боковими робочими органами в другому ярусі. Тому важливими є дослідження щодо визначення енергоємності та зусиль напівблокованого різання, актуальність і доцільність проведення яких подана в публікації [15].

Мета та постановка задач

Визначити закономірності зміни нормального тиску на лобовій поверхні ножа залежно від глибини різання за напівблокованих умов взаємодії з ґрунтовым середовищем за різних кутів різання. Дослідити залежність величини зусилля, необхідного для руйнування ґрунтового середовища, та енергоємності процесу напівблокованого різання від глибини, кута різання та типів ґрунтів.

Викладення основного матеріалу.

Для вирішення вищезазначених завдань спочатку необхідно скласти систему рівнянь рівноваги елементарних сил, що діють на елемент стружки, на нормальну та дотичну осі до місця руйнування (рис. 1).

$$\begin{cases} \Sigma P_n = dN_p + dN' \cos(\alpha_p + \varphi + \psi) = 0; \\ \Sigma P_\tau = dT_{\text{бок.}} + dT_p - dN' \sin(\alpha_p + \varphi + \psi) = 0; \end{cases} \quad (1)$$

з першого рівняння системи маємо:

$$\begin{aligned} dN_p &= -\frac{dN}{\cos(\varphi)} \cos(\alpha_p + \varphi + \psi) = \\ &= -\frac{q \cdot b_{\text{н.бл.}}}{\cos(\varphi) \sin(\alpha_p)} \cos(\alpha_p + \varphi + \psi) dh; \end{aligned} \quad (2)$$

з другого рівняння системи (1) визначимо закон розподілення нормального тиску ґрунту на лобову (фронтальну) площину ножа за глибиною напівблокованого ярусу. Для цього визначимо елементарні сили:

$$dT_{\text{бок.}} = c \cdot dF_{\text{бок.}}, \quad (3)$$

де $dF_{\text{бок.}}$ – елементарна площа вертикальної бокової площини:

$$dF_{\text{бок.}} = h \cdot (ctg(\alpha_p) + ctg(\psi)) dh. \quad (4)$$

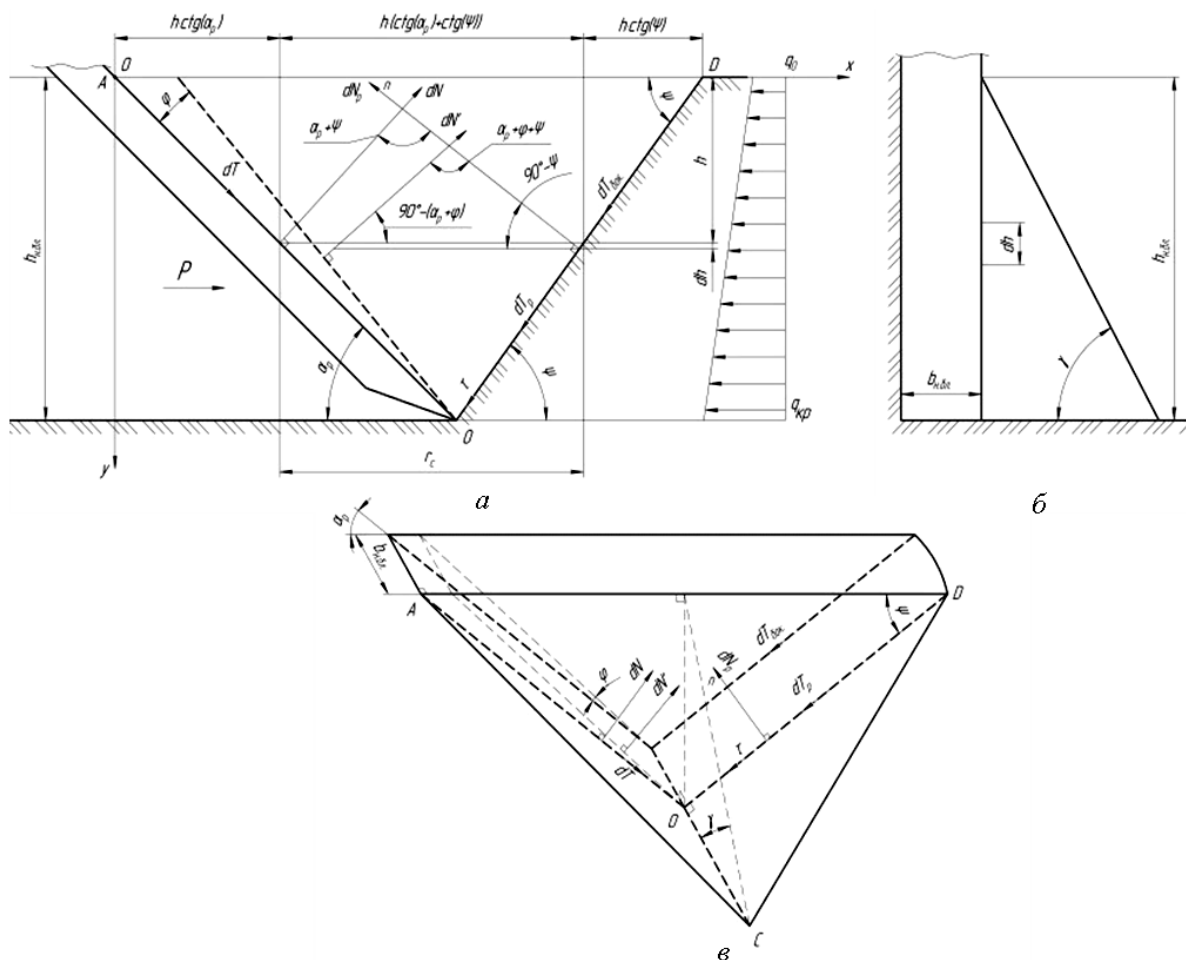
Елементарна дотична сила dT_p , що діє в лобовій площині сколювання, визначається за законом Кулона для ґрунтів (5):

$$dT_p = tg(\varphi_0) \cdot dN_p + c \cdot dF_p. \quad (5)$$

Елементарна площа дорівнює:

$$dF_p = (b_{\text{н.бл.}} + h \cdot ctg(\gamma)) \frac{dh}{\sin(\psi)}, \quad (6)$$

де ψ – кут зсуву ґрунту в поздовжній площині для напівблокованого різання; h – поточне значення глибини.



а – у поздовжній площині; б – у поперечній площині;
в – форма елемента стружки в процесі заглиблення ножа

Рис. 1. Схема взаємодії ножа з ґрунтовим середовищем під час напівблокованого різання ґрунту

Після підставлення елементарних сил у другому рівнянні системи (1), його інтегрування та проміжних перетворень визначимо закономірність зміни нормального тиску на ніж за глибиною:

$$q = \frac{\cos(\varphi_0) \cos(\varphi) \sin(\alpha_p)}{\sin(\alpha_p + \varphi + \varphi_0)} \cdot c \left[\frac{1}{\sin(\psi)} \left(1 + \frac{h}{2b_{н.бл.}} \operatorname{ctg}(\gamma) \right) + (\operatorname{ctg}(\alpha_p) + \operatorname{ctg}(\psi)) \cdot \frac{h}{2b_{н.бл.}} \right]. \quad (7)$$

Для визначення сили напівблокованого різання ґрунту відповідно до (рис. 1, а) складаємо рівняння рівноваги всіх елементарних сил на вісь ОХ:

$$\Sigma P_{OX} = dN_p \sin(\psi) - (dT_p + dT_{бок.}) \cdot \cos(\psi) + dN' \sin(\alpha_p + \varphi) = 0. \quad (8)$$

Якщо враховувати значення елементарних сил dN_p (2), dT_p (5, 6), $dT_{бок.}$ (3, 4), з урахуванням (7) отримаємо:

$$\begin{aligned} dP_{н.бл.} = & dN_p \cdot \sin(\psi) + tg(\varphi_0) \cdot dN \cdot \cos(\psi) + c(b_{н.бл.} + h \cdot \operatorname{ctg}(\gamma)) \operatorname{ctg}(\psi) \cdot dh + c \cdot h \cdot (\operatorname{ctg}(\alpha_p) + \\ & + \operatorname{ctg}(\psi)) \cdot \cos(\psi) dh = \sin(\psi) + \frac{\sin(\varphi_0)}{\cos(\varphi_0)} \cos(\psi) \cdot dN_p + c \cdot [(b_{н.бл.} + h \cdot \operatorname{ctg}(\gamma)) \operatorname{ctg}(\psi) dh + \\ & + h \cdot (\operatorname{ctg}(\alpha_p) + \operatorname{ctg}(\psi)) \cdot \cos(\psi) dh] = -\sin(\varphi_0 + \psi) \frac{\cos(\alpha_p + \varphi + \psi)}{\sin(\alpha_p + \varphi + \varphi_0 + \psi)} c \cdot \left[\frac{1}{\sin(\psi)} \times \right. \\ & \times \left(b_{н.бл.} + \frac{h}{2} \operatorname{ctg}(\gamma) \right) + (\operatorname{ctg}(\alpha_p) + \operatorname{ctg}(\psi)) \cdot \frac{h}{2} \left. \right] dh + c [(b_{н.бл.} + h \cdot \operatorname{ctg}(\gamma)) \operatorname{ctg}(\psi) dh + \\ & + h \cdot (\operatorname{ctg}(\alpha_p) + \operatorname{ctg}(\psi)) \cos(\psi)] dh. \end{aligned} \quad (9)$$

Після інтегрування виразу (9) маємо (10):

$$\begin{aligned} P_{н.бл.} = & -\frac{\sin(\varphi_0 + \psi) \cos(\alpha_p + \varphi + \psi)}{\sin(\alpha_p + \varphi + \varphi_0 + \psi)} c \cdot h \left[\frac{1}{\sin(\psi)} \left(b + \frac{h}{4} \operatorname{ctg}(\gamma) \right) + (\operatorname{ctg}(\alpha_p) + \operatorname{ctg}(\psi)) \frac{h}{4} \right] + c \times \\ & \times h \left[\left(b_{н.бл.} + \frac{h}{2} \operatorname{ctg}(\gamma) \right) \operatorname{ctg}(\psi) + \frac{h}{2} (\operatorname{ctg}(\alpha_p) + \operatorname{ctg}(\psi)) \cos(\psi) \right]. \end{aligned} \quad (10)$$

Тоді енергоємність дорівнює:

$$E_p = \frac{P_{н.бл.}}{b_{н.бл.} h_{н.бл.} + \frac{(h_{н.бл.})^2}{2} \operatorname{ctg}(\gamma)}. \quad (11)$$

Розрахувавши (7), отримаємо графіки залежності зміни нормального тиску (q) на ніж за зміни глибини різання (h) для різних типів ґрунтів і різних кутів різання ($\alpha_p = 20 \dots 50^\circ$) (див. рис. 2).

Для аналізу ефективності напівблокованого способу різання ґрунту за залежністю (10) здійснені розрахунки зусилля, яке необхідне для руйнування ґрунтового середовища за змінної глибини різання (h) та різних кутів різання для різних типів ґрунтів (див. рис. 3).

Знаючи силу, яка необхідна для руйнування ґрунтового середовища (див. рис. 3), визначимо продуктивність робочого процесу руйнування ґрунту напівблокованим способом різання за залежністю (11) (рис. 4).

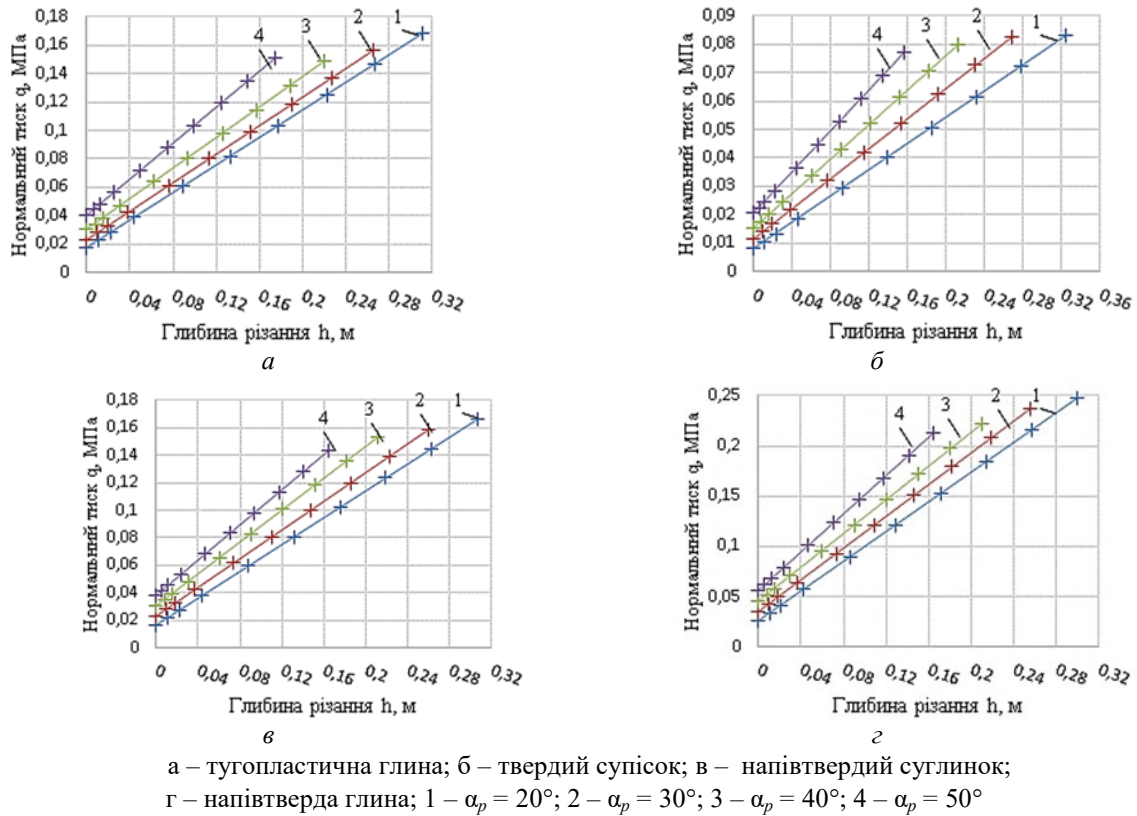


Рис. 2. Залежність нормального тиску (q) від глибини різання (h) за різних кутів (α_p) для різних типів ґрунтів (ширина ножа $b = 0,06$ м)

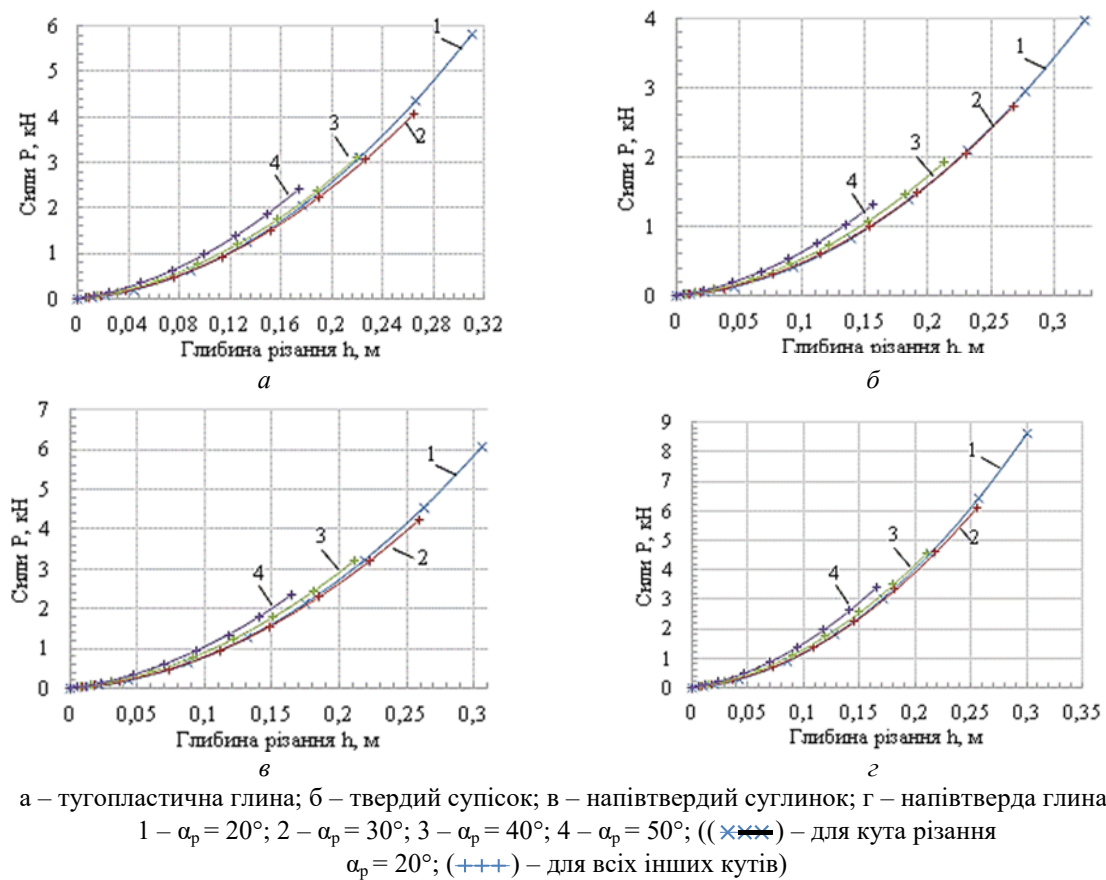
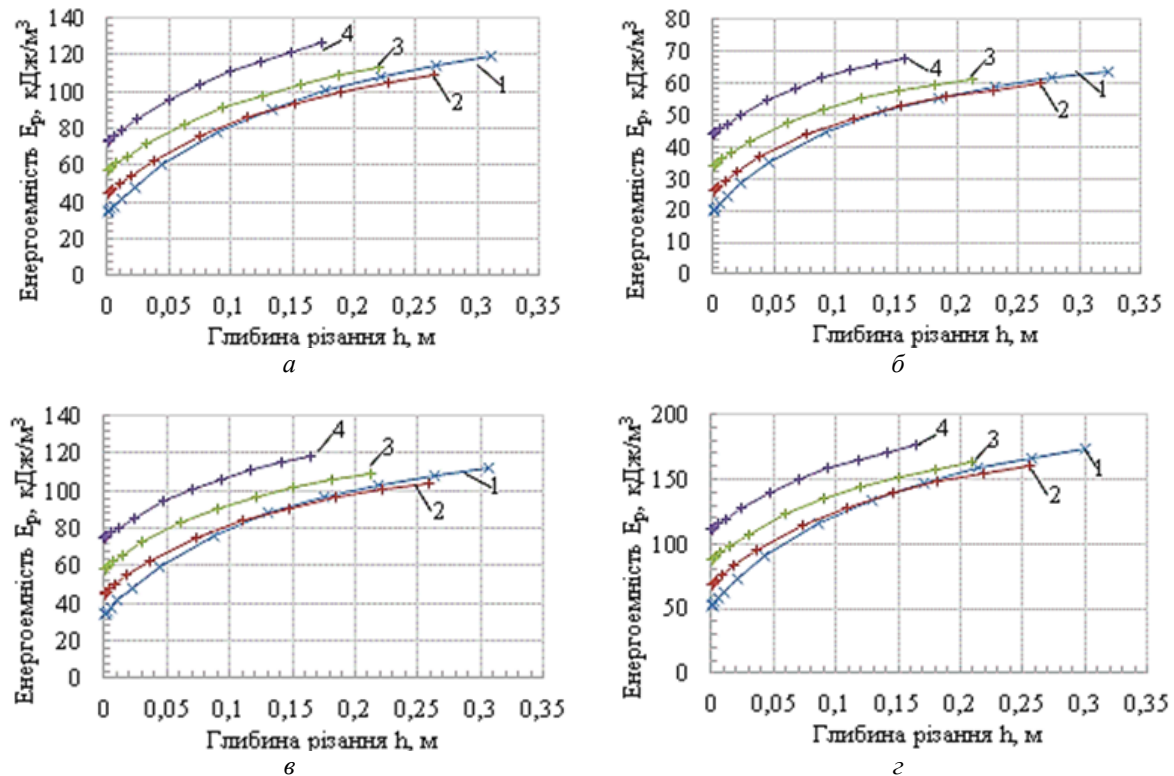


Рис. 3. Залежність сили напівблокованого різання ґрунту (P) від глибини (h) за різних кутів різання (α_p) для різних типів ґрунтів (ширина ножа $b = 0,06$ м)



а – тугопластична глина; б – твердий супісок; в – напівтвердий суглинок;
г – напівтверда глина; 1 – $\alpha_p = 20^\circ$; 2 – $\alpha_p = 30^\circ$; 3 – $\alpha_p = 40^\circ$; 4 – $\alpha_p = 50^\circ$

Рис. 4. Залежність енергоємності (E_p) напівблокованого різання ґрунту від глибини різання (h) за різних кутів різання (α_p) та для різних типів ґрунтів (ширина ножа $b = 0,06$ м)

Висновок

Проведені аналітичні дослідження з визначення нормального тиску (q), сили різання (P), енергоємності (E_p) напівблокованого різання ґрунтового середовища та впливу на них таких елементів:

- глибини різання (h);
- кутів різання (α_p);
- типів ґрунтів.

Отримані залежності:

1) залежність зміни нормального тиску (q) від глибини різання (h) за різних кутів різання (α_p) для різних типів ґрунтів (див. рис. 2);

2) залежність сили напівблокованого різання ґрунту (P) від глибини (h) за різних кутів різання (α_p) для різних типів ґрунтів (див. рис. 3).

За кутів різання $\alpha_p = 20^\circ$, $\alpha_p = 30^\circ$ сили різання є найменшими до певного значення глибини різання, перетнувши яке найменша сила різання спостерігається для кута $\alpha_p = 30^\circ$;

3) залежність енергоємності (E_p) напівблокованого різання ґрунту від глибини різання (h) за різних кутів різання (α_p) та для різних типів ґрунтів (див. рис. 4).

Енергоємність для кутів різання $\alpha_p = 20^\circ$, 30° зі збільшенням глибини різання прямує до одного значення енергоємності, за досягнення якого найменше значення енергоємності робочого процесу спостерігається за кута різання $\alpha_p = 30^\circ$;

4) збільшення значень сили різання та енергоємності за кута різання $\alpha_p = 20^\circ$, як порівняти з кутом $\alpha_p = 30^\circ$, пояснюється тим, що зменшення кута різання з $\alpha_p = 30^\circ$ до $\alpha_p = 20^\circ$ призводить до збільшення довжини лемеша (ножа), який взаємодіє з ґрунтовым середовищем, зі збільшенням глибини різання. Це спричиняє збільшення нормального тиску (q) на лобовій поверхні ножа, а отже, і до збільшення зусилля різання (P) й енергоємності (E_p) процесу руйнування ґрунтового середовища.

Література

1. Критичноглибинні двоярусні ґрунторозпушувачі / С. В. Кравець та ін. Рівне: НУВГП, 2018. 236 с. URL: <https://ep3.nuwm.edu.ua/10061/>
2. Кравець С. В., Стінь О. В. Визначення кута нахилу бічних стінок прорізу до горизонту. Вісник Харківського національного автомобільно-дорожнього університету. 2014. Вип. 65. С. 55–59. URL: <http://bulletin.khadi.kharkov.ua/issue/archive>
3. Визначення сили та енергоємності комбінованого різання при розробці ґрунту на критичну глибину / С. В. Кравець та ін. Вісник Харківського національного автомобільно-дорожнього університету. 2017. Вип. 76. С. 142–149. URL: <http://bulletin.khadi.kharkov.ua/issue/archive>
4. Кравець С. В., Лук'янчук О. П., Хомич А. В. Вплив конструктивних параметрів двоярусного критичноглибинного розпушувача на зусилля опору різання ґрунту. Вісник Національного університету водного господарства та природокористування. 2020. № 1(89). С. 177–189. URL: <https://ep3.nuwm.edu.ua/19309/>
5. Стінь О. В. Дослідження сили і питомого опору вільного різання ґрунтового середовища. Зб. наук. праць. Дніпропетровськ: ГБУЗ «ПГАСА». 2014. № 79. С. 165–172.
6. Кравець С. В., Стінь О. В. Алгоритми створення енергозберігаючих двоярусних глибокорозпушувачів. Вісник НУВГП: зб. наук. праць. 2015. Вип. 2 (70). С. 44–50. URL: <https://ep3.nuwm.edu.ua/>
7. Експериментальне визначення критичної глибини блокованого різання ґрунтів різцями та довжини лемеша ланцюгових екскаваторів / С. В. Кравець та ін. Вісник ХНАДУ. 2021. Вип. 95. С. 43–52. URL: <https://doi.org/10.30977/BUL.2219-5548.2021.95.0.43>
8. Визначення довжини лемеша та сили різання ґрунту різцями (зубами) траншейних екскаваторів / С. В. Кравець та ін. Вісник ХНАДУ. 2020. Вип. 88. Т. II. URL: <https://doi.org/10.30977/BUL.2219-5548.2020.88.2.79>
9. A multi-year study of tillage and amendment effects on compacted soils / F. Mohammadshirazi et al. Journal of Environmental Management. 2017. Vol. 203. P. 533–541. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.07.031>
10. Combining simulations and field experiments: Effects of subsoiling angle and tillage depth on soil structure and energy requirements / K. Liu et al. Computers and Electronics in Agriculture. 2023. Vol. 214. P. 108323. URL: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2023.108323>
11. Discrete element simulations and experiments of soil-winged subsoiler interaction / X. Wang et al. International Journal of Agricultural and Biological Engineering. 2021. Vol. 14. No. 1. P. 50–62. URL: <https://doi.org/10.25165/j.ijabe.202114.01.5447>
12. Methods for reducing the tillage force of subsoiling tools: a review / X. Wang et al. Soil and Tillage Research. 2023. Vol. 229. P. 105676. URL: <https://doi.org/10.1016/j.still.2023.105676>
13. Modeling the technological process of tillage / S. G. Mudarisov et al. Soil and Tillage Research. 2019. Vol. 190. P. 70–77. URL: <https://doi.org/10.1016/j.still.2018.12.004>
14. Recent Advances in Biomimetic Methods for Tillage Resistance Reduction in Agricultural Soil-Engaging Tools / X. Wang et al. Agronomy. 2024. Vol. 14. No. 9. P. 2163. URL: <https://doi.org/10.3390/agronomy14092163>
15. Визначення сили та енергоємності напівблокованого різання ґрунту / Б. І. Степанюк та ін. Нові досягнення в дослідженнях будівельних, дорожніх і підйомно-транспортних машин: зб. тез Міжнар. наук. конф. (Харків, 2025 р.). Харків: ХНАДУ, 2025. С. 92–95.

References

1. Kravets, S. V., Skobliuk, M. P., Stinho, O. V., & Zoria, R. V. (2018). Critical-depth two-tier soil rippers. Rivne: NUWEE. 236 p. URL: <https://ep3.nuwm.edu.ua/10061/>
2. Kravets, S. V., & Stinho, O. V. (2014). Determination of the inclination angle of trench side walls relative to the horizon. Bulletin of Kharkiv National Automobile and Highway University, (65), 55–59. URL: <http://bulletin.khadi.kharkov.ua/issue/archive>
3. Kravets, S. V., Zoria, R. V., Stinho, O. V., & Pimonov, I. H. (2017). Determination of force and energy intensity of combined cutting when developing soil at critical depth. Bulletin of Kharkiv National Automobile and Highway University, (76), 142–149. URL: <http://bulletin.khadi.kharkov.ua/issue/archive>
4. Kravets, S. V., Lukianchuk, O. P., & Khomych, A. V. (2020). Influence of design parameters of a two-tier critical-depth ripper on soil cutting resistance. Bulletin of the National University of Water and Environmental Engineering, 1(89), 177–189. URL: <https://ep3.nuwm.edu.ua/19309/>
5. Stinho, O. V. (2014). Study of the force and specific resistance of free soil cutting. Collection of Scientific Works. Dnipropetrovsk: SHEI "PGASA", (79), 165–172.
6. Kravets, S. V., & Stinho, O. V. (2015). Algorithms for creating energy-saving two-tier deep rippers. Bulletin of NUWEE: Collection of Scientific Papers, (2/70), 44–50. URL: <https://ep3.nuwm.edu.ua/>
7. Kravets, S. V., Suponiev, V. M., Haponov, O. O., Rahulin, V. M., Shchukin, O. V., & Dmytrenko, O. A. (2021). Experimental determination of the critical depth of blocked soil cutting by cutters and the share length of chain excavators. Bulletin of KHNADU, (95), 43–52. <https://doi.org/10.30977/BUL.2219-5548.2021.95.0.43>
8. Kravets, S. V., Bunza, O. Z., Suponiev, V. M., & Haponov, O. O. (2020). Determination of the share length and cutting force of soil with trench excavator cutters (teeth). Bulletin of KHNADU, 88, Vol. II. <https://doi.org/10.30977/BUL.2219-5548.2020.88.2.79>

9. A multi-year study of tillage and amendment effects on compacted soils / F. Mohammadshirazi et al. *Journal of Environmental Management*, 2017, Vol. 203, P. 533–541. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.07.031>
10. Combining simulations and field experiments: Effects of subsoiling angle and tillage depth on soil structure and energy requirements / K. Liu et al. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2023, Vol. 214, P. 108323. URL: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2023.108323>
11. Discrete element simulations and experiments of soil-winged subsoiler interaction / X. Wang et al. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. 2021. Vol. 14, No. 1, P. 50–62. URL: <https://doi.org/10.25165/j.ijabe.202114.01.5447>
12. Methods for reducing the tillage force of subsoiling tools: A review / X. Wang et al. *Soil and Tillage Research*, 2023, Vol. 229, P. 105676. URL: <https://doi.org/10.1016/j.still.2023.105676>
13. Modeling the technological process of tillage / S. G. Mudarisov et al. *Soil and Tillage Research*, 2019, Vol. 190, P. 70–77. URL: <https://doi.org/10.1016/j.still.2018.12.004>
14. Recent Advances in Biomimetic Methods for Tillage Resistance Reduction in Agricultural Soil-Engaging Tools / X. Wang et al. *Agronomy*, 2024, Vol. 14, No. 9, P. 2163. URL: <https://doi.org/10.3390/agronomy14092163>
15. Stepaniuk, B. I., Lukianchuk, O. P., & Kravets, S. V. (2025). Substantiation of the feasibility of determining the force and energy intensity of semi-blocked soil cutting. In *New Achievements in Research on Construction, Road, and Lifting-Transport Machines: Proceedings of the International Scientific Conference (Kharkiv, 2025)*, Pp. 92–95). Kharkiv: KHNADU.

Кравець Святослав Володимирович¹, д.т.н., професор,

s.v.kravets@nuwm.edu.ua
<http://orcid.org/0000-0003-4063-1942>

Тхорук Євген Іванович¹, к.т.н., доцент,

ie.i.tkhoruk@nuwm.edu.ua
<https://orcid.org/0000-0003-2448-4268>

Рукавишніков Юрій Васильович², доцент,

1962brat@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-1079-4030>

Степанюк Богдан Ігорович¹, ст. викладач,

b.i.stepaniuk@nuwm.edu.ua
<https://orcid.org/0009-0000-2415-079X>

¹Національний університет водного господарства та природокористування вул. Соборна, 11, Рівне, Україна,

²Харківський національний автомобільно-дорожній університет, вул. Ярослава Мудрого, 25, м. Харків, Україна

Determination of Force and Energy Intensity of Semi-Blocked Soil Cutting Using a Two-Tier Soil Ripper

Problem. Energy and resource efficiency in soil processing is highly relevant. A significant portion of energy in earthmoving machines is spent overcoming forces during digging, soil movement, and loading. The main disadvantages of conventional working tools include high energy consumption, soil compaction in trench walls, and incomplete or low-quality loosening. **Goal.** To determine the patterns of normal pressure variation on the cutting edge of a blade depending on cutting depth under semi-blocked soil interaction conditions for different cutting angles and soil types; to investigate the dependence of the force required for soil destruction and the energy intensity of the semi-blocked cutting process on depth, cutting angle, and soil type. **Methodology.** Analytical and mathematical methods were used to model the interaction between working tools and soil. Calculations of normal pressure on the blade, cutting force, and energy intensity were performed for different cutting angles and depths. **Results.** An analytical approach was developed to determine the patterns of normal pressure changes on the blade. The dependence of force and energy intensity of the semi-blocked cutting process on depth, cutting angle, and soil type was studied. **Originality.** The study provides a analytical approach to evaluate the changes in normal pressure, cutting force, and energy intensity during semi-blocked soil cutting. It integrates the effects of cutting depth, angle, and soil type, offering a more precise method for predicting and optimizing the performance of two-tier deep rippers. **Practical value.** The results of the study can be used to optimize the design of earthmoving and tiered working tools, reduce energy consumption, and increase the efficiency of soil loosening for various operations and soil types.

Keywords: semi-blocked cutting, normal pressure, force, energy consumption, static soil destruction.

Kravets Sviatoslav¹, Doctor of Technical Sciences, Professor,

s.v.kravets@nuwm.edu.ua
<http://orcid.org/0000-0003-4063-1942>

Tkhoruk Yevhen¹, Ph.D., Associate Professor,

ie.i.tkhoruk@nuwm.edu.ua
<https://orcid.org/0000-0003-2448-4268>

Rukavysnikov Yuriy², Associate Professor,

1962brat@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-1079-4030>

Stepaniuk Bohdan¹, Senior Lecturer,

b.i.stepaniuk@nuwm.edu.ua
<https://orcid.org/0009-0000-2415-079X>

¹National University of Water and Environmental Engineering, 11 Soborna St., Rivne, Ukraine,

²Machines, Kharkov National Automobile and Highway University; 61002, Kharkov, Yaroslava Mudrogo Str., 25.