

ВПЛИВ КОНСТРУКТИВНИХ ПАРАМЕТРІВ ГУСЕНИЧНОГО РУШІЯ СПЕЦІАЛЬНИХ ЗЕМЛЕРИЙНИХ МАШИН НА ВЕЛИЧИНУ ТИСКУ НА ҐРУНТ

Мусійко В.Д.¹, Коваль А.Б.¹, Кириченко І.Г.², Ковалевський С.Г.²

¹ Національний транспортний університет

² Харківський національний автомобільно-дорожній університет

Анотація. У статті викладено результати теоретичних досліджень з визначення середнього та максимального тиску на ґрунт спеціальних землерийних машин безперервної дії залежно від компоувальної схеми машини та дії на машину зовнішніх робочих навантажень з метою оцінювання прохідності машин. Обґрунтовано вимоги щодо установлення додаткових опорних лиж як засобу зменшення тиску машини на ґрунт.

Ключові слова: землерийна машина, гусеничний рушій, ґрунт, тиск, опорна поверхня, опорна лижа, робоче обладнання, прохідність.

Вступ

Прохідність машин, опорною поверхнею для яких є ґрунтова поверхня, визначається насамперед величиною тиску рушіїв на ґрунт, конструктивними особливостями машин та їх робочого обладнання. Це питання набуло особливої актуальності щодо спеціальних землерийних машин для будівництва й капітального ремонту магістральних трубопроводів і машин військово-інженерного призначення.

Визначення тиску зазначених машин на ґрунт має відбуватися з огляду на величину зовнішніх навантажень, що діють на машину в процесі розроблення ґрунтів, і схеми розміщення робочого обладнання на базовому шасі – з одного чи іншого боку, позаду чи попереду шасі.

Вищевикладене зумовлює актуальність питання визначення тиску машин на ґрунт з метою забезпечення їх прохідності.

Аналіз публікацій

Загальновідомі підходи до визначення прохідності гусеничної машини ґрунтовані на встановленні середнього тиску на ґрунт [1–3] за умови різних значень координат центра тиску.

Залежність довжини трака й кількості опорних котків на величину питомого тиску на поверхню ґрунту розглянуто в роботі [4].

Дослідження впливу на ефективність роботи гусеничної машини таких чинників, як крок гусеничного обводу, жорсткість гусеничного рушія на розтягування, кутова жорсткість повороту двох сусідніх траків, зниження кроку гусеничного ланцюга, зменшення жорсткості гусениці на розтягування [5, 6],

проводились, незважаючи на додаткові збурення від зовнішніх сил.

В актуальних дослідженнях вибору рушія для машин спеціального призначення [7] допустимий тиск на ґрунт розглядається як середній тиск на ґрунт тільки від ваги машини.

Мета й постановка завдання

Метою роботи є дослідження та визначення середнього й максимального тиску на ґрунт спеціальних землерийних машин безперервної дії, зважаючи на компоувальні схеми машин та дії на них зовнішніх робочих навантажень.

Щоб досягти поставленої мети, необхідно отримати розрахункові формули для визначення опорної довжини гусениць землерийних машин залежно від величини зовнішніх навантажень, що діють на машину, та координат центра тиску машини на ґрунт. Крім того, важливо наголосити на необхідності установки додаткових опорних лиж на машину з метою забезпечення допустимого тиску рушіїв машини на ґрунт, що забезпечує її прохідність ґрунтовими поверхнями зі слабкою тримкістю.

Визначення тиску на ґрунт

Прохідність гусеничних землерийних машин безперервної дії в слабких ґрунтах є визначальною величиною максимального тиску її рушіїв на опорну поверхню. Величина тиску насамперед визначається вагою базового шасі та вагою навісного обладнання машини, схемою кріплення навісного обладнання на базовому шасі, величиною зовнішніх сил, що діють у процесі розроблення ґру-

нту на робоче обладнання й машину загалом. Величина тиску машин на ґрунтову опорну поверхню зрештою визначає параметри колії, що залишається після проходження машини, опір переміщенню машини, її маневреність та керованість. Особливості конструктивного виконання машин необхідно брати до уваги під час визначення параметрів тиску машини на ґрунт.

Особливістю машини розкриття трубопроводів МВТ-М [8], наприклад, є заднє консольне розташування робочого обладнання, що викликає підвищений тиск на ґрунт під рушійною зіркою, тому важливо знати його величину.

Середній тиск, на відміну від максимального, хоча й не повно характеризує прохідність гусеничних машин у слабких ґрунтах, є, проте, помітним параметром у технічній документації землерийних машин і привертає до себе увагу замовників. Розраховувати його для однієї і тієї самої машини можна за різними узаконеними методиками, досягаючи, звичайно ж, різних результатів.

Якщо прийняти припущення про гусеницю як тверде тіло [9], то залежно від положення центра тиску, епюри (рис. 1) тиску під гусеницею можуть бути такими: прямокутна відповідає середньому тиску, трапецієподібна – транспортному положенню, трикутна – робочому.

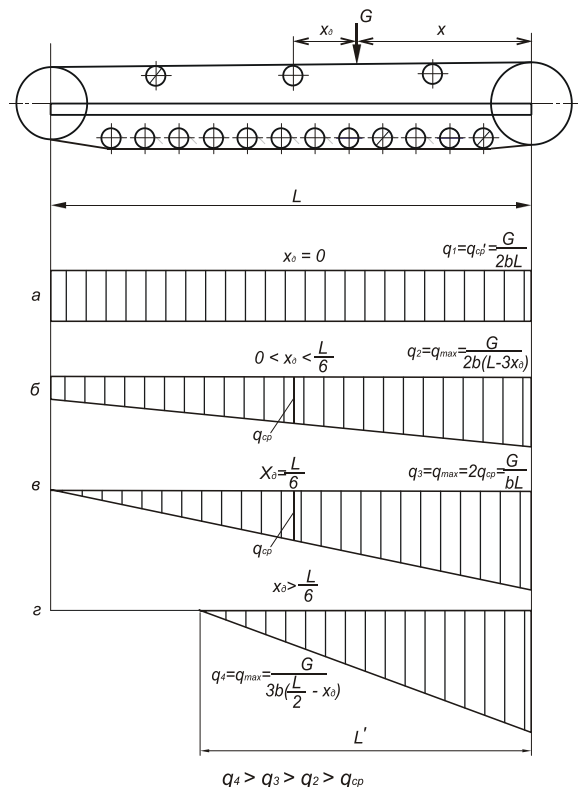


Рис. 1. Розрахункові епюри тиску на ґрунт

Для кожного виду епюри існує формула (див. рис. 1) розрахунку максимального тиску [10, 11].

$$q_{cp} = \frac{mg}{2bL_{on}}, \quad (1)$$

де m – маса машини; g – прискорення вільного падіння; b – ширина гусениці; L_{on} – опорна довжина гусениці.

За вказаними методиками по-різному потрібно визначати лише один параметр – опорну довжину гусениці L_{on} .

У спрощеному варіанті розрахунку рівнодійну прикладених до машини сил приймають рівною силі тяжіння машини. Залежність зміни величини максимального тиску від положення центра тиску, обчисленого за формулами (див. рис. 1), показано на рис. 2. З графіка видно, що за зміни епюри тиску від прямокутної до повної трикутної залежність q_{max} лінійна, а за неповної трикутної з віддаленням центра тиску від середини гусениці – круто зростає.

Для розрахунку середнього тиску на ґрунт екскаваторів-траншеєкопачів опорну довжину L_{on} гусениці приймають [11]

$$L_{on} = L + t, \quad (2)$$

де L – база гусениці; t – крок гусеничної стрічки.

Для одноківшевих екскаваторів [12]

$$L_{on} = L + 0,35d, \quad (3)$$

де d – діаметр кола, описаного навколо частини гусениці, що лежить на рушійній зірочці.

Найбільш жорсткі умови визначення середнього тиску на ґрунт сформульовано в державному стандарті, за вимогами якого опорну довжину гусениці промислових тракторів (базових шасі) потрібно розраховувати за формулою

$$L_{on} = l_1 + l_2 + l_3, \quad (4)$$

де l_1 – проекція на опорну поверхню відстані між осями рушійної зірочки та заднього опорного котка; l_2 – відстань між осями крайніх опорних котків; l_3 – проекція на опорну поверхню відстані між осями натяжного колеса та переднього опорного котка.

Водночас, якщо $\alpha_1 > 2^\circ$, то $l_1 = 0$, а коли $\alpha_2 > 5^\circ$, тоді $l_3 = 0$.

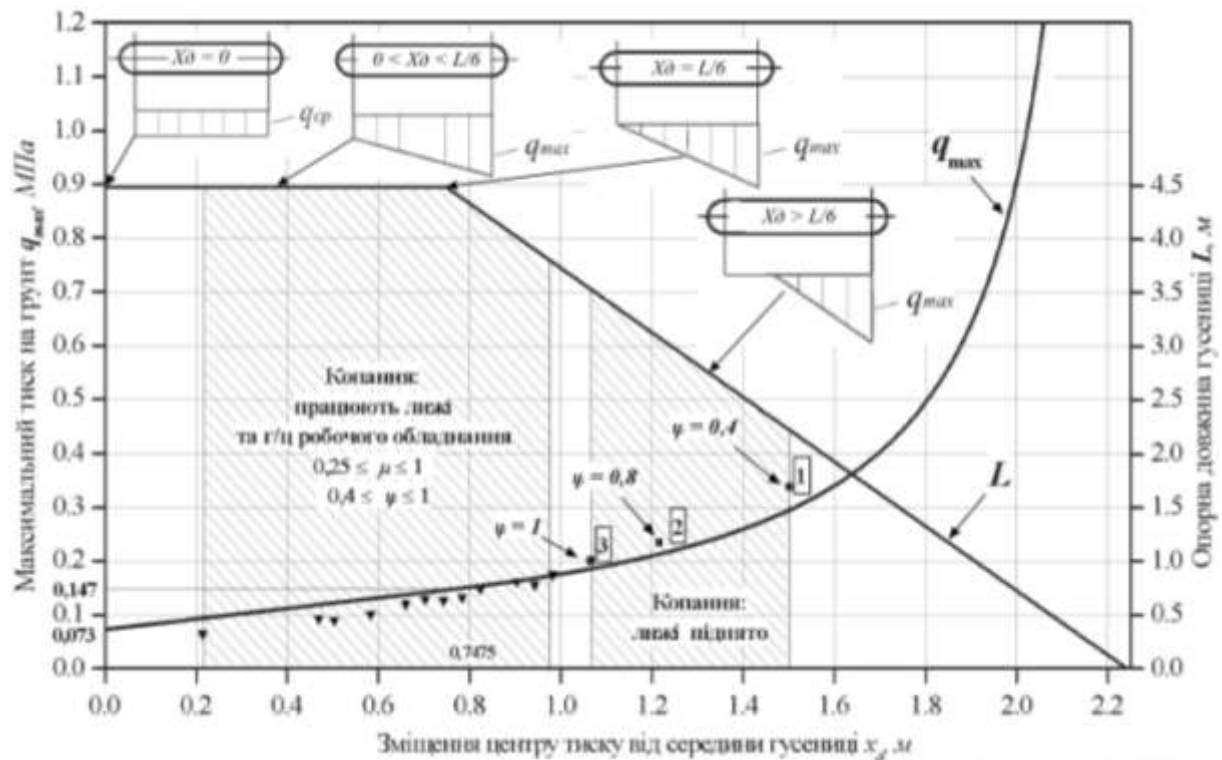


Рис. 2. Залежність опорної довжини L_{on} гусениці та максимального тиску q_{max} машини на ґрунт від положення центра тиску x_0 в робочому режимі

Оброблення статистичних показників гусеничних машин фірми *Caterpillar* [12] показало, що для розрахунків середнього тиску на ґрунт прийнятна формула

$$L_{on} = L + (0,07...0,1), \text{ м.} \quad (5)$$

Універсальне шасі *ШБ-1* землерийних машин комплексу швидкісного капітального ремонту магістральних трубопроводів має низько розташовані (опущені) рушійну зірочку та натяжне колесо ходового вала. Під час роботи машини в слабких ґрунтах до передачі тиску на ґрунт під'єднуються додаткові ділянки гусениці на тяговому та натяжному колесах, збільшуючи цим опорну довжину гусениці та, як наслідок, зменшуючи тиск машини на опорну поверхню, на що необхідно зважати в розрахунках.

Загалом у робочому стані на машину, крім власної сили тяжіння, діє реакція ґрунту на робочий орган (сили різання та тертя), робочого органа по ґрунту, сила тяжіння ґрунту на робочих органах тощо. Тому з огляду на дію цих сил отримаємо точні значення положення центра мас, опорної довжини гусениці та максимального тиску.

Під час копання траншеї на робочий орган *МВТ-М* діє дотичний R_k і нормальний R_n складники реакції сил копання ґрунту (рис. 3), які пов'язані залежністю:

$$R_n = \Psi R_k, \quad (6)$$

де Ψ – коефіцієнт.

Для робочого органа *МВТ-М* приймають $\Psi = 0,4 - 1,0$.

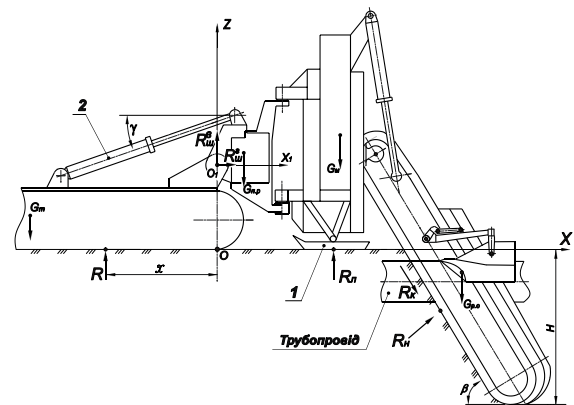


Рис. 3. Розрахункова схема машин

З рівняння рівноваги робочого обладнання машини в процесі копання ґрунту під дією вказаних у системі координат XO_1Z сил (див. рис. 3) визначають реакції R_{u1}^z та R_{u1}^x у шарнірі O_1 , який з'єднує робоче обладнання машини із самохідним шасі *ШБ-1*. Рівнодійну R прикладених до шасі сил та положення центра тиску x_0 гусениць машини визначають з умови рівноваги шасі в системі координат XOZ . Маючи величини R та x_0 для різ-

них робочих режимів машини, визначаємо за допомогою формул (рис. 1) максимальний тиск гусениць на ґрунт.

Для зменшення тиску гусениць на ґрунт у робочому режимі на машині *МВТ-М* передбачено додаткові опорні лижі 1 (див. рис. 3), навантаження й тиск, які можна регулювати гідроциліндрами 2 робочого обладнання, змінюючи цим навантаження на шасі та тиск гусениць і лиж на ґрунт.

Результати точного розрахунку максимального тиску q_{max} під час роботи *МВТ-М* з обпиранням на лижі для різних ґрунтових умов, що враховуються коефіцієнтами μ , Ψ , показано на рис. 4.

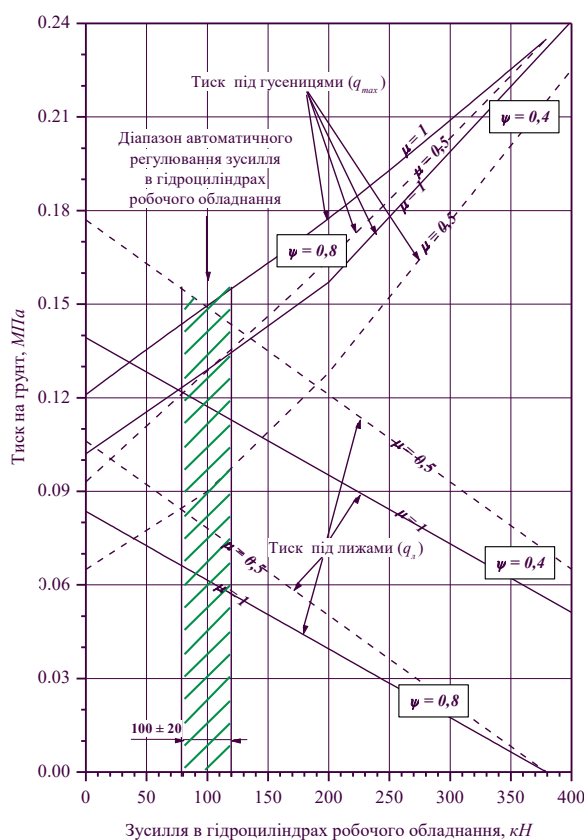


Рис. 4. Залежність тиску під гусеницями (q_{max}) та під лижами (q_l) від зусиль у гідроциліндрах робочого обладнання

Оскільки розбіжність результатів точного та спрощеного розрахунків у режимі копання ґрунту з обпиранням на лижі не суттєві (див. рис. 2), то можна на ранніх стадіях проектування машини рекомендувати спрощений метод визначення максимального тиску на ґрунт.

Запропоновані на рис. 4 графіки залежностей робочих тисків під гусеницями та лижами для можливого діапазону зміни коефіцієнтів $\mu = 0,5 \dots 1,0$ і $\Psi = 0,4 \dots 1,0$ від зусиль

в гідроциліндрах робочого обладнання. З графіків видно, що для найбільш не вигідного поєднання коефіцієнтів μ та Ψ для тиску під гусеницями й лижами існує прийнятний діапазон (100 ± 20 кН) зусиль у гідроциліндрах робочого обладнання, коли максимальні тиски під гусеницями та під лижами не перевищують 0,15 МПа.

Використовуючи це положення, експериментально встановлено, що за допомогою штатної автоматичної системи керування машиною можна підтримувати такий тиск робочої рідини в гідроциліндрах робочого обладнання, який обмежуватиме тиск на ґрунт під гусеницями й лижами величиною 0,15 МПа, що забезпечує прохідність у переважній більшості ґрунтових умов роботи машини *МВТ-М*.

Висновки

1. Визначено теоретичні залежності розрахунку середнього та максимального тиску на ґрунт спеціальних гусеничних машин з огляду на компоновальні схеми машин та дії на них зовнішніх робочих навантажень.
2. Отримано залежність визначення опорної довжини гусениць землерийної машини від дії зовнішніх сил залежно від координат центра тиску на ґрунт, що дає змогу визначати необхідність установа додаткових опорних лиж на машину з метою забезпечення допустимого тиску машини на ґрунт.
3. Запропоновано спосіб обмеження тиску на ґрунт під гусеницями й межами машини у визначеному діапазоні внаслідок зміни робочого тиску в гідроциліндрах ґрунторозробного робочого обладнання машини.
4. Установлено, що тиск під гусеницями машини не перевищує 0,15 МПа і забезпечує прохідність машини в переважній більшості ґрунтових умов роботи машини.

Література

1. Водяник І.І. *Експлуатаційні властивості тракторів і автомобілів*. Київ, 1994. 224 с.
2. Налобіна О.О., Голотюк М.В., Бундза О.З., Серілко Д.Л., Гавриш В.С. Дослідження експлуатаційних властивостей машин і обладнання: навч. посіб. Рівне, 2023. 414 с.
3. Білик Б.В. *Проектування самохідних лісових машин: Вибір параметрів, компоновання і тяговий розрахунок*: навч. посіб. Львів, 2004. 160 с.
4. Дранішніков О. Огляд і сучасні удосконалення гусеничного рушія. *Новини агротехніки*. Київ, 2004. № 5. С. 24–28.
5. Ch.V. Boikov, P. Zhdanovich, S. Sizova. Design Development of Elastic Wheel-Track and Track

- Traction Systems of Tractors and Agricultural Machines. SAE International Off-Highway and Powerplant Congress and Exposition. 1997. DOI: <https://doi.org/10.4271/972732>.
6. Kai Lv, Xihui Mu, Lishun Li. Design and test methods of rubber-track conversion system Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Journal of Automobile Engineering, v. 233, no. 7, pp. 1903–1929, 2018. <https://doi.org/10.1177/0954407018794101>.
 7. Круць Т.І., Попович В.В., Зінко Р.В., Поляков А.П. Методика вибору рушія для машин спеціального призначення. *Вісник машинобудування та транспорту*. Вінниця, 2021, № 2(14). С. 46–51. DOI: <https://doi.org/10.31649/2413-4503-2021-14-2-46-51>
 8. Хмара Л.А., Мусійко В.Д. Сучасні машини для виконання земляних робіт при ремонті трубопроводів безпідйомним способом. *Вісник ХНАДУ*. Харків, 2016. Вип. 73. С. 190–195.
 9. Мусійко В. Д. Визначення тиску спеціальних землерийних машин на ґрунт в робочому та транспортному режимах. Будівництво. *Матеріалознавство. Машинобудування. Інтенсифікація робочих процесів будівельних і дорожніх машин. Серія: Підйомно-транспортні, будівельні та дорожні машини і обладнання*. Дніпропетровськ, 2016. Вип. 88. С. 87–93.
 10. ДСТУ 3932-2000 (ISO 8643:1997). Машини землерийні. Гідравлічні екскаватори і зворотні лопати-навантажувачі. Технічні вимоги і методи випробувань. Київ, 2000.
 11. ДСТУ 2556-94 Екскаватори одноковшові універсальні гідравлічні. Терміни та визначення. Київ, 1994.
 12. Excavators. Technical specifications. Caterpillar. URL: https://www.cat.com/en_US/products/new/equipment/excavators.html (дата звернення 25.02.2025).
 5. Ch.V. Boikov, P. Zhdanovich, S. Sizova, “Design Development of Elastic Wheel-Track and Track Traction Systems of Tractors and Agricultural Machines”, in SAE International Off-Highway and Powerplant Congress and Exposition. 1997. doi: <https://doi.org/10.4271/972732>.
 6. Kai Lv, Xihui Mu, Lishun Li, “Design and test methods of rubber-track conversion system Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers”, Journal of Automobile Engineering, v. 233, no. 7, pp. 1903–1929, 2018. <https://doi.org/10.1177/0954407018794101>.
 7. T. Krutz, V. Popovych, R. Zinko, A. Polyakov Methodology for choosing a propulsion device for special-purpose vehicles. Bulletin of Mechanical Engineering and Transport. Vinnytsia, 2021, No. 2(14), pp. 46–51. DOI: <https://doi.org/10.31649/2413-4503-2021-14-2-46-51>.
 8. Khmara L.A., Musiiko V.D. *Suchasni mashyny dlya vykonannya zemlyanykh robir pry remonti trubo-provodiv bezpidyomnym sposobom* [Modern machines for performing earthworks during pipeline repair using a non-lifting method]. *Visnyk KHNADU* [Bulletin of Kharkov National Automobile and Highway University]. Kharkiv, 2016. Issue 73, pp. 190–195.
 9. Musiiko V.D. *Vyznachennya tysku spetsial'nykh zemleryynykh mashyn na grunt v robochomu ta transportnomu rezhymakh* [Pressure determination of special earthmoving machines on the ground in working and transport mode]. *Budivnytstvo. Mate-rialovedennya. Mashynobuduvannya. Intensyfyka-tsiya robochykh protsesiv budivelnikh i dorozhnykh mashyn. Seriya: Pidyomno-transportni, budivelni ta dorozhni mashyny i obladnannya*. [Construction. Materials management. Mechanical engineering. Intensification of work processes of construction and road machines. Series: Lifting and transport, construction and road machines and equipment]. Dnipropetrovsk, 2016. Issue 88, pp. 87–93.
 10. DSTU 3932-2000 (ISO 8643:1997). *Mashyny zemleryyni. Hidravlichni ekskavatory i zvorotni lopaty-navantazhuvachi. Tekhnichni vymohy i me-tody vyprobuvan* [State Standard 3932-2000 (ISO 8643:1997) Earth-moving machinery. Hydraulic excavators and backhoe loaders. Technical requirements and test methods]. Kyiv, 2000.
 11. DSTU 2556-94 *Ekskavatory odnokovshovi universal'ni hidravlichni. Terminy ta vyznachennya* [State Standard 2556-94 Universal hydraulic single-bucket excavators. Terms and definitions]. Kyiv, 1994.
 12. Excavators. Technical specifications. Caterpillar. Available at: https://www.cat.com/en_US/products/new/equipment/excavators.html (accessed 25 February 2025).

References

1. Vodyanyk I.I. *Ekspluatatsiyni vlastyvoli traktoriv i avtomobiliv* [Operational properties of tractors and automobiles]. Kyiv, Harvest Publ., 1994. 224 p.
2. Nalobina O.O., Holotyuk M.V., Bundza O.Z., Serilko D.L., Havrysh V.S. *Doslidzhennya ekspluatatsiynykh vlastyvolostey mashyn i obladnannya* [Research of operational properties of machines and equipment: teaching manual]. Rivne, 2023. 414 p.
3. Bilyk B.V. *Proektuvannya samokhidnykh lisovykh mashyn: Vybir parametriv, komponuvannya i tyahovy rozrakhunok* [Design of self-propelled forestry machines: Selection of parameters, layout and traction calculation]. Lviv, 2004. 160 p.
4. Dranishnikov O. *Ohlyad i suchasni udoskonalennya husenychnoho rushiya*. [Review and modern improvements of the caterpillar drive]. *Novyny ahrotekhniki* [Agricultural Engineering News]. Kyiv, 2004. No. 5, pp. 24–28.
5. Мусійко Володимир Данилович¹, д.т.н., проф., зав. каф. інженерії машин транспортного будівництва, тел. +38 050-104-02-62, musvd48@gmail.com,

Коваль Андрій Борисович¹, к.т.н., доц. каф. інженерії машин транспортного будівництва, тел. +38 050-024-08-94, kandr6104@gmail.com, **Кириченко Ігор Георгійович**², д.т.н., проф. каф. будівельних і дорожніх машин, igk160450@gmail.com,

Ковалевський Сергій Германович², к.т.н., доц. каф. будівельних і дорожніх машин ім. А. М. Холодова, тел. +38097-24-071-80; 2407180@ukr.net,

¹Національний транспортний університет, 01010, Україна, м. Київ, вул. М. Омеляновича-Павленка, 1.

²Харківський національний автомобільно-дорожній університет, 61002, Україна, м. Харків, вул. Ярослава Мудрого, 25.

Influence of design parameters of the tracked propulsion system of special earthmoving machines on ground pressure

Abstract. Problem. The passability of continuous-operation tracked earthmoving machines on soils with low bearing capacity is determined by the maximum pressure exerted by their propulsion systems on the support surface. The pressure magnitude is influenced by the weight of the machine's base chassis and mounted equipment, the mounting equipment's attachment scheme to the base chassis, and the magnitude of external forces acting on the working equipment and the machine as a whole during soil excavation. The pressure exerted by the machine on the support surface determines the track parameters left after the machine passes, resistance to movement, maneuverability, passability, and controllability. When calculating the maximum pressure of machines on the ground, the specific structural features of the machines must be taken into account. **Goal.** This study aims to investigate and determine the average and maximum ground pressure of special continuous-operation earthmoving machines, considering the machine layout schemes, external working loads acting on them, and the physical and mechanical properties of the supporting soil surfaces. **Methodology.** The research methodology is theoretical and experimental. **Results.** As a result of the conducted research, theoretical dependencies have been

obtained for calculating the average and maximum ground pressure of special tracked machines, taking into account their structural features and the external working loads acting on them. **Originality.** The scientific novelty lies in considering the impact of external forces acting on the working equipment and the machine as a whole when determining the maximum pressure of tracked propulsion systems of continuous-operation earthmoving machines on the ground. **Practical value.** Calculations of the support surface length of the tracks of earthmoving machines, depending on the influence of external forces and the coordinates of the machine's pressure center on the ground, allow for determining the necessity of installing additional support skis on the machine to ensure an acceptable ground pressure, thereby enhancing its passability. As a result of the conducted research, a method has been proposed to limit the pressure on the ground under the machine's tracks and skis within a specified allowable range by adjusting the working pressure in the hydraulic cylinders of the excavation equipment's lifting and lowering system.

Key words: earthmoving machine, tracked propulsion system, soil, pressure, support surface, support ski, working equipment, passability.

Musiiko Volodymyr¹, professor, Doct. of Science, Head of Department of Transportation Construction Machinery Engineering, ORCID: 0000-0001-9983-3296, musvd48@gmail.com,

Koval Andrii¹, Ph.D., Assoc. Prof., Department of Transportation Construction Machinery Engineering, ORCID: 0000-0003-1295-820, kandr6104@gmail.com,

Kyrychenko Igor², professor, Doct. of Science, Department of Construction and Road machines, ORCID: 0000-0002-2128-350,

igk160450@gmail.com,

Kovalevskyi Serhii², Ph.D, Assoc. Prof. Department of Construction and Road-Building Machinery, ORCID: 0000-0002-6299-2223, 2407180@ukr.net,

²National Transport University, 1, M. Omelianovicha-Pavlenka st., Kyiv, 01010, Ukraine.

²Kharkov National Automobile and Highway University, 25, Yaroslava Mudrogo str., Kharkiv, 61002, Ukraine.