

## ОЦІНКА ПОВОРОТНОСТІ ТА ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ КЕРОВАНОСТІ МАШИНИ ПІДБИВАННЯ ҐРУНТУ ПІД ТРУБОПРОВОДОМ

*Мусійко В.Д.*, доктор технічних наук, Національний транспортний університет, Київ, Україна, musvd@i.ua, orcid.org/0000-0001-9983-3296

*Коваль А.Б.*, кандидат технічних наук, Національний транспортний університет, Київ, Україна, kandr@i.ua, orcid.org/0000-0003-1295-8200

*Ніколаєнко В.А.*, кандидат технічних наук, Національний транспортний університет, Київ, Україна, vanikolaienko@ukr.net, orcid.org/0000-0003-3983-0434

*Рагулін В.М.*, кандидат технічних наук, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, м. Харків, Україна, ragulinrvn@ukr.net, orcid.org/0000-0003-2083-4937

## ASSESSMENT OF MANEUVERABILITY AND ENSURING CONTROLLABILITY OF THE SOIL COMPACTING MACHINE UNDER PIPELINE

*Musiiko V.D.*, Doctor of Technical Science, National Transport University, Kiev, Ukraine, musvd@i.ua, orcid.org/0000-0001-9983-3296

*Koval A.B.*, Candidate of Science (Engineering), National Transport University, Kyiv, Ukraine, kandr@i.ua, orcid.org/0000-0003-1295-8200

*Nikolaienko V.A.*, Candidate of Science (Engineering), National Transport University, Kyiv, Ukraine, vanikolaienko@ukr.net, orcid.org/0000-0003-3983-0434.

*Ragulin V.M.*, Candidate of Science (Engineering), Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, Ukraine, ragulinrvn@ukr.net, orcid.org/0000-0003-2083-4937

**Постановка проблеми та її актуальність.** Ефективна робота спеціальних землерийних машин в значній мірі обумовлюється стійкістю та стабільністю характеристик взаємодії їх ходового обладнання з опорною поверхнею. Нестійке положення машин під час руху, особливо в режимі повороту, поблизу об'єктів підвищеної небезпеки, наприклад магістральних трубопроводів в процесі копання ґрунту є вкрай небезпечним. Це може викликати не санкціоноване бокове зміщення машини і навіть руйнування трубопроводів. В максимальній мірі це стосується роботи машин підбивання (ущільнення) ґрунту під трубою на криволінійних в плані ділянках трубопроводів.

Виникнення небезпечних ситуацій під час роботи на трубопроводах обумовлюється зовнішніми навантаженнями землерийних машин, їх конструктивними особливостями, режимами копання ґрунту, рельєфом та властивостями ґрунтів в яких прокладено трубопроводи. Мінімізація негативного впливу цих чинників на стійкість землерийних машин в режимі копання ґрунту є задачею, що має бути обов'язково вирішена в процесі створення спеціальних землерийних машин безперервної дії.

Необхідність забезпечення точного переміщення землерийних машин відносно трубопроводу як на прямих так і на криволінійних його ділянках вимагає повної керованості машин, що забезпечується відсутністю буксування гусеничних рушіїв в робочих режимах руху. Це досягається шляхом приведення центра тиску машини на ґрунт максимально близько до геометричних центрів опорних їх контурів.

Особливо гострою є необхідність вирішення вказаного питання для машин у яких під дією зовнішніх навантажень, що виникають на робочих режимах роботи, центр тиску зміщується по координатним вісям опорного контуру.

Сформульована задача має бути вирішена комплексно – для різних варіантів монтажу робочого обладнання: на кормі, попереду, збоку тягача, обладнанням машин опорними лижами та без них. Найбільш актуальним на цей час є вирішення поставленого питання для машин, в яких робоче обладнання розміщене збоку. Прикладом є машина для засипки та ущільнення ґрунту під трубопроводом МП-М.

**Мета статті.** Визначення умов поворотності та керованості землерийних машин безперервної дії з робочим обладнанням розміщеним збоку від шасі в умовах циклічного зміщення центра тиску в межах опорного контуру.

### Аналіз результатів досліджень і публікацій.

Дослідження прохідності гусеничних землерийних машин в різних ґрунтових умовах [1-3] забезпечення необхідної стійкості, в тому числі курсової [4-6], покращення тягово-зчіпних властивостей ходового обладнання на різних режимах його роботи [1, 2, 6] є підґрунтям для встановлення основних загальних вимог до тягачів спеціальних землерийних машин безперервної дії різного технологічного призначення.

Згідно [1] під час визначення середнього тиску машин на ґрунт враховується маса машини, а зовнішні навантаження не враховуються. Однак середній тиск є параметром умовним і не може повною мірою визначати ходові якості машини. Деякі дослідники [1, 2, 7, 8] вважають середній тиск мірою прохідності гусеничної машини, обмежуючи при цьому повздовжнє зміщення центра тиску  $x$  величиною  $x < L_o/6$  ( $L_o$  – опорна довжина гусениці). За умови знаходження рівнодіючої в межах ядра перетину опорної поверхні машини, на їх думку, виключається відрив гусениць від ґрунту [2, 9, 10, 11], розподіл тиску під опорними поверхнями є прийнятним, що і забезпечує необхідну стабільність контакту гусениць з опорною поверхнею. Положення координат центра тиску спеціальних землерийних машин безперервної дії на ґрунт в процесі їх створення мають визначатись з урахуванням зовнішніх навантажень, що діють на машину і, головне, сил копання ґрунту.

### Основна частина.

У комплексі машин для капітального ремонту трубопроводів машина для засипання та підбивання ґрунту під трубопроводом МП-М виконує завершальні операції – забирає ґрунт з відвалу підбирачем, транспортує його стрічковим конвеєром у траншею, засипає ґрунт під корпус труби і здійснює його ущільнення спеціальним робочим обладнанням, виключаючи у такий спосіб просідання відремонтованого трубопроводу.

Характерною ознакою машини підбивання ґрунту під трубопровід МП-М [12] є наявність двох робочих органів – підсіпки, що встановлюється позаду машини та ущільнення, що встановлюється консольно збоку машини. Таке розташування робочих органів неминуче приводить до зміщення центра мас машини назад щодо поперечної осі  $y$  у бік ближньої до труби гусениці щодо подовжньої осі базового шасі.

У робочому режимі стріла з ґрунтоущільнювальним робочим обладнанням машини для засипання та підбивання ґрунту під трубопровід МП-М розташована перпендикулярно до подовжньої осі шасі, внаслідок чого центр тиску зміщується на величину  $y$  в бік ближньої до труби гусениці В (рис. 1), коли лопаті не ущільнюють ґрунт під трубою і вертикальна складова реакції ґрунту на них  $P_g = 0$ , а також на величину  $y'$  у бік гусениці А під час стиснення ґрунту під трубою ( $P_g > 0$ ).

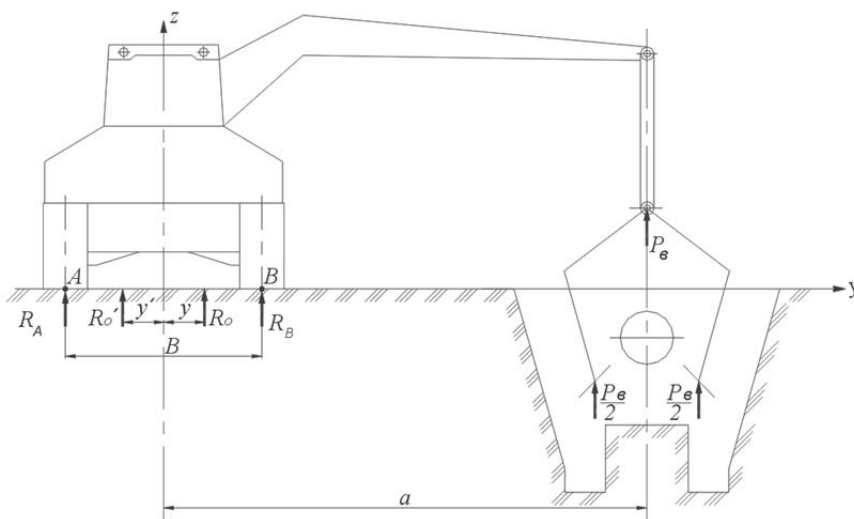


Рисунок 1 – Схема до розрахунку вертикальних навантажень на гусениці  
Figure 1 – Diagram for calculating vertical loads on the caterpillars

Вертикальні навантаження на гусениці можна визначити з умови рівноваги (див. рис. 1):

$$R_A = G \left( 0,5 - \frac{y}{B} \right) + P_e \left( \frac{a}{B} - 0,5 \right), \quad (1)$$

$$R_B = G \left( 0,5 + \frac{y}{B} \right) - P_e \left( \frac{a}{B} + 0,5 \right), \quad (2)$$

де  $G$  – сила тяжіння машини;

$B$  – колія;

$a$  – відстань між осями шасі і трубопроводу.

Протягом циклу ущільнення ґрунту під трубопроводом вертикальна складова  $P_e$  на лопатях змінюється від нуля до максимуму, значення якого визначає тиск у гідроциліндрах приводу лопатей та положення штоків гідроциліндрів.

Залежності вертикальних навантажень на гусениці від сили  $P_e$ , розрахованих за формулами (1), (2), показано на рис. 2. З графіків видно, що коли  $P_e = 0$ , реакції  $R_A$  і  $R_B$  визначає величина поперечного зміщення центра тиску  $y$ , а  $R_A < R_B$ . Збільшення під час стиснення ґрунту вертикальної складової  $P_e$ , що прикладена до оголовку стріли ґрунтоущільнювального обладнання, приводить до перерозподілу навантажень на гусениці: ближня до трубопроводу розвантажується ( $R_B$  зменшується), а навантаження на дальню ( $R_A$ ) – збільшується. Існує значення сили  $P_e$ , за якої навантаження на гусениці будуть однаковими ( $R_A = R_B$ ). Подальше зростання вертикальної сили  $P_e$  супроводжується зменшенням навантаження ( $R_B$ ) на ближню до труби гусеницю і може настати момент, коли  $R_B = 0$ . Це означає, що опорні котки гусениці  $B$  відірвуться від бігової доріжки траків. Така ситуація небажана з багатьох причин, тож її не допускають, регулюючи величину максимального тиску в гідроциліндрах приводу лопатей за допомогою запобіжного клапана.

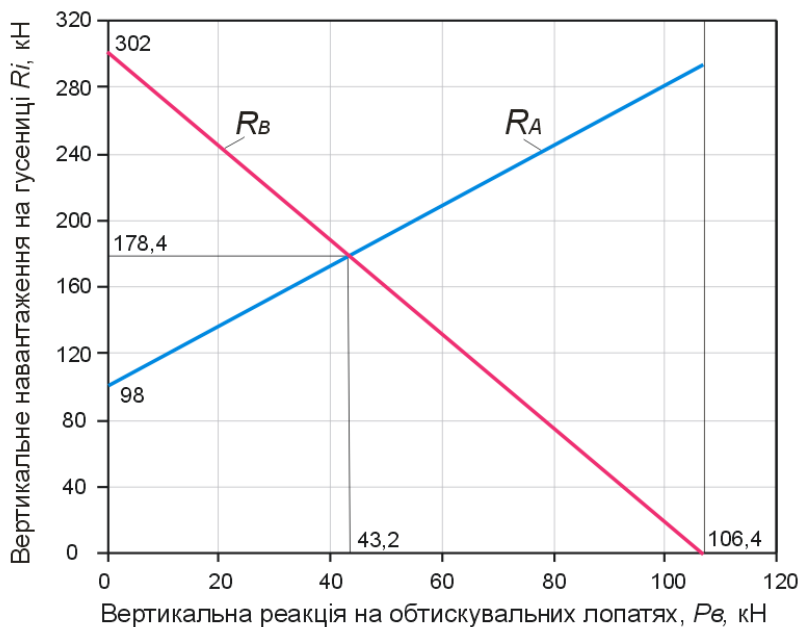


Рисунок 2 – Залежність вертикальних навантажень на гусениці від вертикальних реакцій на обтискувальних лопатях

Figure 2 – Dependence of vertical loads on caterpillars on vertical reactions on the compacting blades

На рис. 3 наведено осцилограму одного циклу роботи ґрунтоущільнювального механізму. Робочий хід (стиснення ґрунту під трубопроводом) лопаті виконують під дією тиску робочої рідини в поршневих порожнинах гідроциліндрів (крива 2). У будь-якому положенні лопатей під час ущільнення ґрунту за різницею тисків у поршневій та штоковій (крива 1) порожнинах можна визначити вертикальну складову  $P_e$  реакції ґрунту на лопатях [12] та розрахувати навантаження  $R_A$  і  $R_B$  на гусениці за формулами (1) і (2).

Під час руху зовнішньою стороною криволінійної ділянки трубопроводу, коли  $P_e = 0$ , а  $R_A \approx 1/3 R_B$  (див. рис. 1), вертикального навантаження на зовнішню гусеницю  $A$  може бути замало для забезпечення достатнього її зчеплення з ґрунтом, бо під час повороту гусениця працює у ведучому режимі, реалізуючи великі тягові зусилля. Надмірне буксування гусениці неприпустимо, бо може створити аварійну ситуацію на трубопроводі.

Щоб запобігти цьому, потрібно за допомогою штатної автоматизованої системи керування машиною давати команду на поворот гідромоторам приводу гусениць в проміжку робочого циклу  $\Delta t$  (див. рис. 3), коли тиск в гідроциліндрах приводу лопатей відповідає вертикальній складовій  $P_v$ , за якої навантаження на зовнішню гусеницю  $A$  буде мати значення  $R_A \geq 0,5R_B$ .

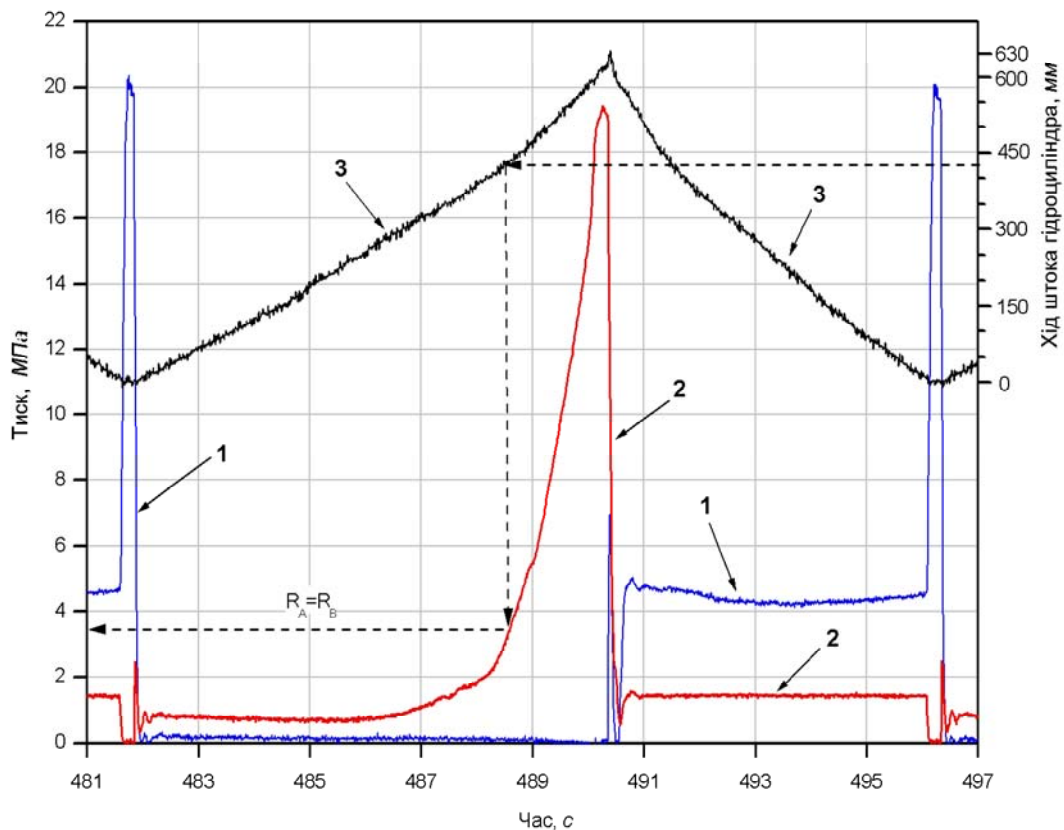


Рисунок 3 – Осцилограма зміни тиску в гідроциліндрах приводу лопатей протягом циклу ущільнення: 1 – штокова порожнина гідроциліндра приводу лопаті; 2 – поршнева порожнина гідроциліндра приводу лопаті; 3 – датчик положення штока

Figure 3 – Oscillogram of pressure change in the hydraulic cylinder of the blade drive throughout the compaction cycle: 1 – rod chamber of the blade drive hydraulic cylinder; 2 – piston chamber of the blade drive hydraulic cylinder; 3 – position sensor of the rod

На стійкість руху машини має суттєвий вплив зміщення центра мас як під час прямолінійного так і під час поворотного режимів руху.

Зміщення центра тиску по поздовжній осі машини, пов'язане з розташуванням центра мас машини чи з навантаженнями від робочого процесу, призводить до зміщення полюсів повороту гусениць з поперечної осі ходового устаткування, що полегшує умови повороту.

Момент опору повороту машини визначається:

$$M_{\text{пов}} = \mu \cdot \frac{Q \cdot L}{4} \cdot K, \quad (3)$$

де  $Q$  – рівнодійна прикладених до машини сил;

$L$  – опорна довжина гусениці;

$\mu$  – коефіцієнт опору повороту;

$K$  – коефіцієнт, який враховує зменшення моменту опору повороту.  $K \leq 1$ .

Перерозподіл вертикальних навантажень на гусениці призводить до поперечного зміщення центра тиску ( $y$  на рис. 1) відповідно сил тяги в них та погіршення керованості машини.

Для визначення нормальних реакцій на гусеницях складаються рівняння моментів сил відносно полюсів  $A$  і  $B$ :

$$R_A = \frac{Q}{2} \cdot \left(1 - \frac{2 \cdot y}{B}\right); \quad (4)$$

$$R_B = \frac{Q}{2} \cdot \left(1 + \frac{2 \cdot y}{B}\right), \quad (5)$$

де  $B$  – колія машини.

Сили тяги на гусеницях під час повороту зовнішньої гусениці  $A$  визначаються:

$$P_A = f \cdot R_A + \mu \cdot \frac{Q \cdot L}{4 \cdot B} \cdot K; \quad (6)$$

$$P_B = f \cdot R_B - \mu \cdot \frac{Q \cdot L}{4 \cdot B} \cdot K, \quad (7)$$

де  $f$  – коефіцієнт опору переміщенню машини.

У випадку, якщо під час повороту зовнішня гусениця машини, що має поперечне зміщення центра тиску, буде навантажена нормальною силою, що не достатня для реалізації потрібного тягового зусилля для повороту, можливі проблеми з поворотом машини,

Поворот машини на горизонтальному майданчику можливий за умови:

$$\varphi \cdot R_A \geq P_A, \quad (8)$$

де  $\varphi$  – коефіцієнт зчеплення гусениці з ґрунтом;

$R_A, P_A$  – відповідно нормальна реакція та тягове зусилля в гусениці що дальня від труби та зовнішня в процесі повороту.

Підставимо вирази для  $R_A$  (4) і  $P_A$  (6) у формулу (8):

$$\varphi \cdot \frac{Q}{2} \cdot \left(1 - \frac{2 \cdot y}{B}\right) \geq f \cdot \frac{Q}{2} \cdot \left(1 - \frac{2 \cdot y}{B}\right) + \mu \cdot \frac{Q \cdot L}{4 \cdot B} \cdot K \quad (9)$$

та визначимо умову можливості повороту:

$$\frac{L}{B} \leq \frac{2 \cdot (\varphi - f)}{\mu \cdot K} \cdot \left(1 - \frac{2 \cdot y}{B}\right). \quad (10)$$

Машини підбивання ґрунту працює на діючих трубопроводах і до неї застосовуються заходи підвищеної безпеки, тому надмірне буксування будь-якої гусениці в процесі повороту на робочих режимах є небажаним. Проведемо аналіз формули (10) для реальних параметрів базового тягача машини і можливих ґрунтових умов роботи на трасі.

За заданого співвідношення  $L/B$  (для самохідного шасі ШБ-1  $L/B = 1,7$ ) гарантований поворот машини можливий із радіусом не менше мінімального. Умовою його реалізації є забезпечення зчеплення зовнішньої в процесі повороту гусениці з ґрунтом. Знайдемо цей мінімальний радіус для машини МП-М.

З виразу (10) знаходимо коефіцієнт опору повороту для реалізації мінімально допустимого радіусу повороту:

$$\mu = \frac{2 \cdot (\varphi - f)}{\frac{L}{B} \cdot K} \cdot \left(1 - \frac{2 \cdot y}{B}\right). \quad (11)$$

Коефіцієнт опору повороту пов'язаний з радіусом повороту машини відомою емпіричною формулою А.О. Нікітіна [13]:

$$\mu = \frac{\mu_{max}}{0,85 + 0,15 \cdot \frac{R}{B}}, \quad (12)$$

де  $\mu_{max}$  – коефіцієнт опору повороту з повністю загальмованою гусеницею;

$R$  – радіус повороту машини по зовнішній гусениці;

$B$  – колія машини.

Звідси:

$$\frac{R}{B} = \frac{\mu_{max}}{0,15 \cdot \mu}, \quad (13)$$

а мінімальний допустимий радіус повороту

$$R_{min} = B \cdot \frac{\mu_{max} - 0,85 \cdot \mu}{0,15 \cdot \mu} \quad (14)$$

Порівняємо допустимі радіуси повороту машини МП-М для двох характерних типів ґрунтових умов, що знаходяться на краях діапазону можливих характеристик ґрунтових опорних поверхонь: нормальну – суху щільну поверхню ґрунту ( $\mu_{max} = 0,8$ ;  $f = 0,1$ ;  $\varphi = 0,8$ ) та екстремальну – поверхню з розпушеним суглинистим вологим ґрунтом ( $\mu_{max} = 0,5$ ;  $f = 0,15$ ;  $\varphi = 0,4$ ). Екстремальні умови утворюються на режимах роботи машини МП-М в разі коли підбирач не використовує всього ґрунту з відвалу після машини розкриття трубопроводів МВТ-М і гусениці рухаються по розпушеному ґрунту, в результаті утворюється глибока колія, що утруднює рух і поворот машини. Крім того на вологій поверхні зменшується коефіцієнт зчеплення гусениць з ґрунтом.

Припустивши, що епюра розподілу тиску гусениць на ґрунт має прямокутний вигляд (тобто  $K = 1$ ), як гірший випадок повороту машини, розрахуємо допустимі мінімальні радіуси повороту машини з формул (10) та (14) в залежності від зміщення центра тиску  $y$  в поперечному напрямку. Результати розрахунків наведено на рис. 4, де крім отриманих кривих  $R_{min} = f(y)$ , також зазначено допустимі мінімальні радіуси кривизни трубопроводів в плані, що повинні бути не меншими 60 діаметрів трубопроводу.

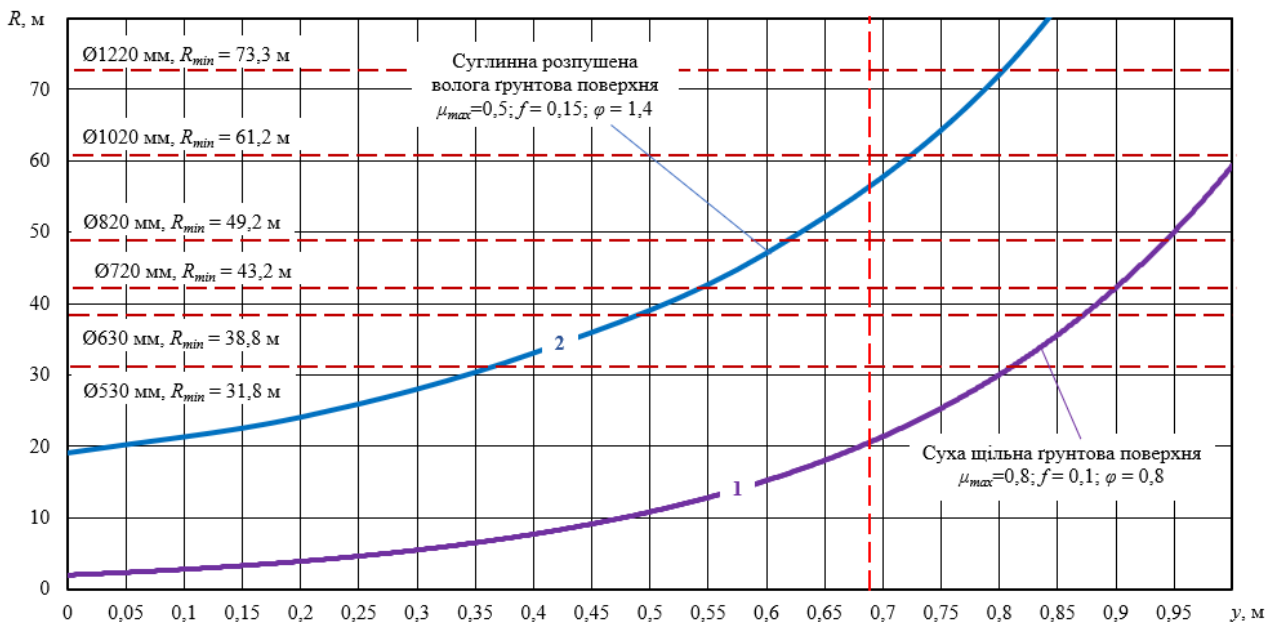


Рисунок 4 – Залежність мінімального радіуса повороту машини від поперечного зміщення центра тиску

Figure 4 – Dependence of the machine's minimum turning radius on the lateral displacement of the center of pressure

У машині МП-М на реальних режимах роботи на криволінійних ділянках трубопроводів поперечне зміщення центра тиску не перевищує 0,685 м, тому в нормальних ґрунтових умовах проблем з поворотом машини не виникає (крива 1). На таких же режимах роботи машини, але в екстремальних ґрунтових умовах на трубопроводах діаметром 820 мм і менше надмірне буксування зовнішньої гусениці, що працює як ведуча, може приводити до втрати поворотності машини МП-М (крива 2). Під час роботи в таких ґрунтових умовах машиністу та оператору машини необхідно приділяти підвищену увагу поворотності машини.

## Висновки.

1. Розкрита фізична суть та отримані розрахункові залежності визначення вертикальних навантажень на гусениці базових шасі землерийних машин безперервної дії за умови зміщення центра тиску машини на ґрунт в межах опорного контура.
2. Встановлено умови гарантованого повороту двогусеничної машини, що переміщується вздовж трубопроводу без буксування зовнішньої гусениці в режимі ущільнення ґрунту під трубопроводом.
3. Отримано аналітичну залежність для визначення мінімально допустимого радіусу повороту машини під час переміщення її без буксування вздовж трубопроводів різних діаметрів в різних ґрунтових умовах.

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Лебедев А.Т. Трактори та автомобілі. Ч.3. Шасі; Навч. посібник / А.Т. Лебедев, В.М. Антощенко, М.Ф. Бойко та ін. –К.: Вища освіта, 2004. – 336 с.
2. Kacigin, V.V., Guskov, V.V. The basis of tractor performance theory. Part 1-General laws of soil strength and deformation (1968) *Journal of Terramechanics*, 5 (3), pp. 43-66. doi: 10.1016/0022-4898(68)90080-3.
3. Wong, J.Y. *Terramechanics and Off-Road Vehicle Engineering* (2010) *Terramechanics and Off-Road Vehicle Engineering*. doi: 10.1016/C2009-0-00403-6
4. Коваль А. Б. Визначення умов забезпечення курсової стійкості універсальних землерийних машин. Дис.... канд. техн. наук 05.05.04 / Андрій Борисович Коваль. Нац. трансп. ун-т. – К. , 2014. – 218 с.
5. Y. Yuan, J. Gai, G. Zeng, Z. Han, Z. Sun and Y. Li, "Research on Electric Bulldozer Straight Driving Stability," 2019 3rd Conference on Vehicle Control and Intelligence (CVCI), Hefei, China, 2019, pp. 1-6, doi: 10.1109/CVCI47823.2019.8951634.
6. Островерх О. О. Керованість та стійкість рух тракторів : навчальний посібник / О. О. Островерх, В. М. Краснокутський, Т. О. Крюкова. – Харків : Друкарня Мадрид. 2021. – 156 с.
7. Білоконь Я.Ю. Трактори та автомобілі / Я.Ю. Білоконь, А.І. Окоча, С.О. Войцехівський. – К.: Вища освіта, 2003. – 560
8. Главацькій К.Ц., Проскурня В.М. (2007). Визначення впливу опору пересуванню і повороту гусеничного тягача на загальний опір руху причіпного катка та глибини просідання мало опорної гусениці при будівництві та ремонті колії. *Наука та прогрес транспорту*, (17), 86–89. <https://doi.org/10.15802/stp2007/17568>
9. Супонев В.М., Рагулін В.М., Розенфельд М.В. Визначення конструктивних параметрів та опору переміщення в ґрунті робочого обладнання ножового трубнозаглиблювача // *Машинобудування*, 2022, № 30, С. 42–50
10. Мусійко В.Д. Зменшення інерційних та динамічних навантажень універсальної землерийної машини. / В.Д. Мусійко, А.Б.Коваль // *Systemy i srodki transportu samochodowego. Wubrane zagadnienie. Monografia Nr 4. Seria: Transport pod redakcja naukowa Kazemierza Lejdy.* – Rzeszów (Polska) : Politechnika Rzeszowska – 2013. S. 129-138.
11. Wildner, David; Herlitzius, Thomas; Berg, Torsten (2020). Model for the analysis of the influence of the dynamic load shift on the traction behavior of a pipe laying machine. *Landtechnik* Volume 75, Issue 4, Pages 176 – 193, 2020. DOI 10.1515/lt.2020.3244.
12. Білякович, М.О. Дослідження якості ущільнення ґрунтового ложа магістральних трубопроводів та вибір параметрів ґрунтоущільнюючого механізму / М.О. Білякович, В.Д. Мусійко, В. Л. Салюк, М.П Кузьмінець // *Metody Obliczeniowe i Badawcze w Rozwoju Pojazdow Samochodowych i Maszyn Roboczych Samojedznych.* – Rzeszow: Politechnika Rzeszowska – SAKON' 01, 2001. — S. 35-40.
13. Коваль А.Б. Забезпечення керованості гусеничних землерийних машин безперервної дії за умови монтажу їх робочого обладнання збоку від базового шасі // *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво. Науково-технічний збірник. К. : НТУ, 2022. – Вип. 112. С. 287-294. DOI: 10.33744/0365-8171-2022-112-287-294.*

## REFERENCES

1. Lebedev A.A. (2004). *Traktory ta avtomovili. Ch.3. Shasi [Tractors and cars. Part 3. Chassis]*. Kyiv: Vyscha osvita. [in Ukrainian].

2. Kacigin, V.V., & Guskov, V.V. (1968) The basis of tractor performance theory. Part 1-General laws of soil strength and deformation Journal of Terramechanics, 5 (3), pp. 43-66. doi: 10.1016/0022-4898(68)90080-3.
3. Wong, J.Y. Terramechanics and Off-Road Vehicle Engineering (2010) Terramechanics and Off-Road Vehicle Engineering. doi: 10.1016/C2009-0-00403-6
4. Koval A.B. *Vuznachennia umov zabezpechennia kursovoi stiikosti universalnykh zemlerynykh mashyn* Diss. [Definition of the conditions assuring the course stability of the multipurpose earth-moving machine. Diss.]. Kyiv, 2013. 219 p. [in Ukrainian].
5. Lebedev A.A. (2004). Traktory ta avtomovili. Ch.3. Shasi [Tractors and cars. Part 3. Chassis]. Kyiv: Higher Education. [in Ukrainian].
6. Ostroverkh O.O., Krasnokutskyi B. M., & Krukova T.O. (2021) Kerovnist ta stiikist rukhu traktoriv. [Maneuverability and stability of tractor movement] Kharkiv: Madrid Printing House [in Ukrainian].
7. Bilokon Ya. Yu. (2003) Traktory ta avtomovili. [Tractors and cars]. Kyiv: Higher Education. [in Ukrainian].
8. Glavatskyi, K. T., & Proskurnia, V. M. (2007). Determination of the influence of support movement and rotation of the crawler tractor on the total motion resistance of the rink and depth of subsidence few reference tracks in the construction and repair of ruts. Science and Transport Progress, (17), 86–89. <https://doi.org/10.15802/stp2007/17568>
9. Suponev V., Ragulin V., & Rozenfeld N. (2022) Determining the structural parameters and forces of resistance to movement in the soil of the working equipment of the knife pipe dredger. Engineering. №3, P. 42–50.
- 10/ Musiiko V.D, & Koval A.B. (2013) Zmenshennia inertsinykh ta dynamichnykh navantazhen universalnoi zemlerynoi mashyn [Reduction of inertial and dynamic loads of universal earthmoving machines] Systemy i srodki transportu samochodowego. Wubrane zagadnienie. Monografia Nr 4. Seria: Transport pod redakcja naukowa Kazemierza Lejdy. – Rzeszów (Polska) : Politechnika Rzeszowska. S. 129-138. [in Ukrainian].
11. Wildner, David; Herlitzius, Thomas; Berg, Torsten (2020) Model for the analysis of the influence of the dynamic load shift on the traction behavior of a pipe laying machine. Landtechnik Volume 75, Issue 4, Pages 176 – 193, 2020. DOI 10.1515/lt.2020.3244.
12. Biliakovych M.O., Musiiko V.D., Saluk V.L. & Kuzminets M.P. (2001) Doslidzhennia yakosti ushchilnennia gruntovoho lozha mahistralnykh truboprovodiv ta vybir parametriv gruntoushchilnuchoho mekhanizmu [Research as soil compaction bed pipelines and choice of parameters of equipment tamp]. Metody Obliczeniowe i Badawcze w Rozwoju Pojazdow Samochodowych i Maszyn Roboczych Samojezdnych., issue 01, pp. 35-40.
13. Koval A.B. (2022) Controllability assurance in continuously operating tracked earthmoving machines under conditions of working equipment mounding to the side from the base chassis. Automobile roads and road construction., Issue 112. P. 287-294. DOI: 10.33744/0365-8171-2022-112-287-294

## РЕФЕРАТ

Мусійко В.Д. Оцінка поворотності та забезпечення керованості машини підбивання ґрунту під трубопроводом / В.Д. Мусійко, А.Б. Коваль, В.А. Ніколаєнко, В.М. Рагулін // Вісник Національного транспортного університету. Серія «Технічні науки». Науковий, науково-виробничий журнал. – К.: НТУ, 2024. – Вип. 1 (58).

В статті приведено результати теоретичних досліджень зі створення методики оцінювання та забезпечення керованості спеціальних землерийних машин безперервної дії, що працюють в режимах переміщення вздовж трубопроводу, як об'єкту підвищеної небезпеки.

Розглядається рух машини для засипання та ущільнення ґрунту під трубопроводом, що працює в режимах зміни величини та координат прикладання зовнішніх вертикальних навантажень на механізм ходу базового шасі.

Оцінку забезпечення керованості машини МП-М виконано для умов переміщення машини вздовж прямолінійних ділянок трубопроводу, та на криволінійних ділянках траси, коли машина переміщується по сухій щільній ґрунтовій поверхні та по суглинному розпушеному ґрунту. Встановлено, що визначальний вплив на поворотність машини має величина зміщення центра тиску машини на ґрунт, що обумовлюється координатами прикладання сил тяжіння машини та зовнішніх сил, які циклічно діють на машину в процесі ущільнення ґрунту.



Отримані залежності визначення вертикальних навантажень на гусениці базового шасі в процесі ущільнення ґрунту під трубою, коли вертикальні навантаження, що діють на ґрунтоущільнюване обладнання змінюється від нуля до свого максимуму. Визначено умови можливого відриву одної з гусениць машини в процесі ущільнення ґрунту та умови сталого руху машини МП-М вздовж трубопроводу в процесі ущільнення ґрунту під трубою, не зважаючи на перерозподіл вертикальних навантажень між гусеницями.

Аналітичним шляхом встановлено умови виключення надмірного буксування зовнішньої гусениці базового шасі машини під час повороту в робочому режимі. Для заданих співвідношень між базою  $L$  та колією  $B$  машині визначено мінімальний радіус  $R_{min}$  гарантованого повороту машини, що рухається вздовж криволінійної ділянки трубопроводу за умови зчеплення зовнішньої, під час повороту, гусениці з ґрунтом.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** МАШИНА, УЩІЛЬНЕННЯ ҐРУНТУ, ТРУБОПРОВІД, НАВАНТАЖЕННЯ, ТИСК, ШАСІ, БУКСУВАННЯ, РАДІУС

### ABSTRACT

Musiyko V.D., Koval A.B., Nikolaenko V.A., Ragulin V.M. Assessment of maneuverability and ensuring controllability of the soil compacting machine under pipeline. Visnyk National Transport University. Series «Technical sciences». Scientific, scientific and industrial journal. – K.: NTU, 2024. – Issue 1 (58).

The article presents the results of theoretical research on the development of a methodology for assessing and ensuring the controllability of special continuous action earth-moving machines that operate in modes of movement along the pipeline, as an object of increased danger.

It considers the movement of the machine for backfilling and compacting soil under the pipeline, working in modes of changing the magnitude and coordinates of applying external vertical loads on the chassis's walking mechanism.

The assessment of the machine's MP-M controllability was performed for the conditions of the machine's movement along straight sections of the pipeline and on curved sections of the track when the machine moves on a dry dense soil surface and on loamy loosened soil. It was found that the decisive influence on the machine's maneuverability is the magnitude of the shift of the machine's center of pressure on the soil, which is determined by the coordinates of the application of the machine's gravity forces and the external forces that cyclically act on the machine during the soil compaction process.

The dependencies for determining the vertical loads on the caterpillars of the base chassis during the soil compaction process under the pipe, when vertical loads acting on the soil-compacting equipment change from zero to its maximum, were obtained. Conditions for possible detachment of one of the machine's caterpillars during the soil compaction process and conditions for the stable movement of the MP-M machine along the pipeline during the soil compaction process under the pipe, despite the redistribution of vertical loads between the caterpillars, were determined.

Analytically, conditions for eliminating excessive skidding of the outer caterpillar of the base chassis of the machine during turning in the working mode were established. For given ratios between the base  $L$  and track width  $B$  of the machine, the minimum radius  $R_{min}$  of guaranteed turning of the machine moving along a curved section of the pipeline under the condition of the outer, during turning, caterpillar's engagement with the soil was determined.

**KEYWORDS:** MACHINE, SOIL COMPACTION, PIPELINE, LOAD, PRESSURE, CHASSIS, SKIDDING, RADIUS

### АВТОРИ:

Мусійко Володимир Данилович, доктор технічних наук, професор, Національний транспортний університет, завідувач кафедри інженерії машин транспортного будівництва, e-mail: musvd@i.ua, тел: +380501040262, Україна, 01010, м. Київ, вул. М. Омеляновича-Павленка, 1, кв. 226а, orcid.org/0000-0001-9983-3296.

Коваль Андрій Борисович, кандидат технічних наук, доцент, Національний транспортний університет, доцент кафедри інженерії машин транспортного будівництва, e-mail: kandr@i.ua, тел. +380500240894, Україна, 01010, м. Київ, вул. М. Омеляновича-Павленка, 1, к. 226, orcid.org/0000-0003-1295-8200.

Ніколаєнко Володимир Анатолійович, кандидат технічних наук, доцент, Національний транспортний університет, доцент кафедри інженерії машин транспортного будівництва, e-mail:

vanikolaienko@ukr.net, тел: +380679786117, Україна, 01010, м. Київ, вул. М. Омеляновича-Павленка, 1, к.226. orcid.org/0000-0003-3983-0434.

Рагулін Віталій Миколайович, кандидат технічних наук, доцент, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, доцент кафедри будівельних і дорожніх машин, e-mail: ragulinrvn@ukr.net, тел. +380972957392, Україна, 61002, м. Харків, вул. Ярослава Мудрого, 25, orcid.org/0000-0003-2083-4937.

**AUTHORS:**

Musiiko Volodymyr Danylovych., Doctor of Technical Science, Professor, National Transport University, Head of Department of Transportation Construction Machinery Engineering, Professor, e-mail: musvd@i.ua, Phone +380501040262, Ukraine, 01010, Kyiv, street. M. Omelianovycha-Pavlenka, 1, ap. 226a, orcid.org/0000-0001-9983-3296.

Koval Andrii Borysovych., Candidate of Science (Engineering), Associate Professor, National Transport University, Associate Professor of Department of Transportation Construction Machinery Engineering, e-mail: kandr@i.ua, Phone +38050240894, Ukraine, 01010, Kyiv, M. Omelianovycha-Pavlenka, 1, of. 226, orcid.org/0000-0003-1295-8200.

Nikolaienko Volodymyr Anatoliiovych, Candidate of Science (Engineering), Associate Professor, National Transport University, Associate Professor of Department of Transportation Construction Machinery Engineering, e-mail: vanikolaienko@ukr.net, Phone +380679786117, Ukraine, 01010, Kyiv, street. M. Omelanovich-Pavlenko, 1, of. 226. orcid.org/0000-0003-3983-0434.

Ragulin Vitaliy Mykolaiovych, Candidate of Science (Engineering), Associate Professor, Kharkiv National Automobile and Highway University, Associate Professor Department of Construction and Road-Building Machinery, e-mail: ragulinrvn@ukr.net, Phone +380972957392, Ukraine, 61002, Kharkiv, Yaroslava Mudrogo str., 25, orcid.org/0000-0003-2083-4937.

**РЕЦЕНЗЕНТИ:**

Ковбасенко С.В., кандидат технічних наук, доцент, Національний транспортний університет, професор кафедри інженерії машин транспортного будівництва, Київ, Україна.

Іткін О. Ф., доктор технічних наук, генеральний директор ПрАТ «Промислово-виробничий інститут зварювально-ізоляційних технологій при будівництві трубопроводів «Нафтогазбудізоляція», Київ, Україна.

**REVIEWERS:**

Kovbasenko S. V., Candidate of Science (Engineering), National Transport University, Professor of Department of Transportation Construction Machinery Engineering, Kyiv, Ukraine.

Itkin O. F., Doctor of Technical Sciences, General Director «Neftegazstroyizoliatsiya» Industrial Production Institute of welding-insulation technologies to a piping building, Kyiv, Ukraine.