

ДОСЛІДЖЕННЯ НАВАНТАЖЕННЯ ПНЕВМОКОЛІСНОГО СКРЕПЕРА

Ковалевський С. Г., Бугаєнко Д. В., Чорний Є. Є.
Харківський національний автомобільно-дорожній університет

***Анотація.** Підвищення ефективності використання будівельних машин вимагає розроблення розрахункових схем і математичних моделей для дослідження навантажень, які діють у металокопії робочого обладнання. Проведений огляд досліджень з підвищення тягових властивостей пневмоколісної землерийно-транспортної будівельної техніки демонструє, що загальною проблемою є недостатність тягово-зчіпних якостей. Подолати цей недолік можна завдяки використанню машин з усіма провідними колесами, а в разі використання скрепера це можливо завдяки впровадженню провідного привода задніх коліс. Модернізація трансмісії дозволяє збільшити продуктивність завдяки збільшенню об'єму ґрунту в ковші, або скороченню часу заповнення ковша, але призводить до зміни навантажень у вузлах металокопії.*

***Ключові слова:** скрепер; моделювання; робочий процес; навантаження; металокопії; провідні колеса.*

Вступ

Напівпричіпні та самохідні будівельні машини (скрепери, траншейні екскаватори, прокладальники комунікацій) використовуються під час землерийних робіт, а також для перевезення різноманітних будівельних матеріалів (самоскиди, бітумо- та цементовози) [1].

Визначальною особливістю цих машин є передача частини ваги робочого обладнання на базовий тягач, що дозволяє підвищити тягові властивості машини.

Додатково підвищити тягові якості такої техніки можливо завдяки приводу задніх коліс, тобто створенню повнопривідної машини.

Досвід використання пневмоколісних скреперів показав неможливість повного навантаження ґрунту до ковша без використання схем роботи з використанням додаткових тягачів або примусових механізмів [2].

Серед великої кількості засобів підвищення ефективності скреперів одним з найбільш поширених є використання повнопривідних машин [3], в яких передача крутного моменту на задню вісь здійснюється від основного або додаткового двигуна, що дозволяє збільшити ступінь заповнення ковша скоротити час копання, але призводить до зміни навантажень, що діють у вузлах металокопії скрепера. Таким чином, необхідність підвищення ефективності експлуатації пневмоколісних скреперів з усіма провідними колесами завдяки використанню раціональних режимів роботи та визначення закономірностей навантаження металокопії скрепера на основі створеної розраху-

нкової схеми та математичної моделі є актуальним завданням.

Аналіз публікацій

У роботі [4] проведено дослідження навантаження несних рам напівпричепів для перевезення сільськогосподарської продукції, які експлуатуються в умовах бездоріжжя. Використання методу мінімуму потенціальної енергії деформації дозволило врахувати енергії згину та кручення.

Моделювання дозволило оптимізувати конструкцію рами та її вузлів, підвищити рівень надійності та зменшити матеріаломісткість, що підвищило термін та безпеку експлуатації напівпричепів.

Питання визначення зусиль, що діють у тяговій рамі самохідного скрепера з усіма тяговими колесами, на основі розробленої математичної моделі розглянуто в роботі [5], але дослідження впливу розподілу сили тяги між тягачем та скрепером на навантаження не проводилося. Не досліджувалася також робота скрепера на ґрунтах різної категорії, які впливають на тип процесів, а сама модель потребує доопрацювання.

У статті [6] навантаження металокопії скрепера розглядається на основі сил, що діють статично, без врахування динамічної складової, що призводить до похибок у дослідженнях та розрахунках.

Під час експериментальних досліджень навантаження моделей задніх стінок ковша скрепера в умовах зміни висоти кріплення приводу гідроциліндра з використанням поляризаційно-оптичного методу та порівняння

з розрахунками методами кінцевих елементів було визначено, що традиційна конструкція задньої стінки скрепера вимагає вдосконалення щодо оптимальної конфігурації і міцності [7]. Запропоновану методику в майбутньому можливо використати в дослідженнях навантаження тягової рами.

Новий метод випробування ґрунту на абразивність для визначення впливу геологічних параметрів саме абразивного піщаного ґрунту на зношення ножевого обладнання скреперів запропоновано в статті [8].

Вплив основних факторів на ефективність роботи скрепера в гравійних ґрунтах під час проведення експериментальних досліджень розглянуто в роботі [9].

У дослідженні наведено процес застосування методу дискретних елементів для оптимізації використання скрепера під час земляних робіт у сільському господарстві [10].

Мета та постановка завдання

Визначення закономірностей навантаження металоконструкції напівпричіпного скрепера з приводом задньої осі та раціонального розподілу тягових зусиль між тягачем і скрепером.

Математичне моделювання напівпричіпного скрепера з усіма провідними колесами

Проведений аналіз конструкції і умов експлуатації скреперів дозволили визначити обмеження, які були використані під час складання схеми.

Як пружний елемент була використана тягова рама, яка має найнижчу жорсткість з-поміж інших вузлів металоконструкції.

Розрахункова схема напівпричіпного скрепера з усіма провідними колесами під час копання ґрунту (рис. 1) наведена у вигляді двох мас m_1, m_2 , які мають поздовжні, вертикальні і кутові переміщення x, y, φ .

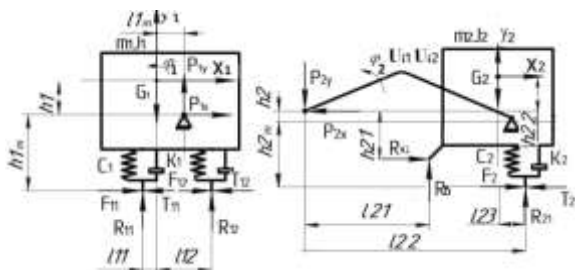


Рис. 1. Розрахункова схема напівпричіпного скрепера

Сили тяги на тягових колесах тягача позначені як T_1, T_2 сили тяги та скрепера $-T_3$, реакції ґрунту на осях $-R_1, R_2, R_3$, опір коєнню коліс $-F_1, F_2, F_3$, горизонтальна та вертикальна складові сили опору копання, прикладені до ножа скрепера, $-R_G, R_B$, сили тяжіння $-G_1, G_2$. Жорсткість тягової рами скрепера в горизонтальному напрямку позначена як U_{i1} , а у вертикальному $-U_{i2}$.

Радіальна жорсткість провідних коліс $-C_1, C_2, C_3$, коефіцієнти демпфування $-K_1, K_2, K_3$.

Вертикальні реакції на колесах:

$$R_1 = C_1[-y_1 + (l_1 + l_{1m})\varphi_1] + k_1[-y_1 + (l_1 + l_{1m})\varphi_1]; \tag{1}$$

$$R_2 = C_1[-y_1 - (l_2 - l_{1m})\varphi_1] + k_1[-y_1 - (l_2 - l_{1m})\varphi_1]; \tag{2}$$

$$R_3 = C_2(-y_2 + l_{22}\varphi_2) + k_2(-y_2 - l_{22}\varphi_2). \tag{3}$$

Реакції у шарнірах тягової рами:

$$P_{ix} = U_{11}\Delta x_i + U_{12}\Delta y_i, \tag{4}$$

$$P_{iy} = U_{21}\Delta x_i + U_{22}\Delta y_i, \tag{5}$$

де Δx_i – деформація рами в горизонтальному напрямку, Δy_i – деформація рами в вертикальному напрямку.

Величини $\Delta x_i, \Delta y_i$ визначені як різниця переміщень крапок кріплення тягової рами до тягача та скрепера:

$$\Delta x_1 = x_1 - x_2, \tag{6}$$

$$\Delta y_1 = y_1 - y_2. \tag{7}$$

Сили опору різанню ґрунту:

$$\begin{aligned} R_G &= Ax_2 \\ R_B &= R_G\psi \end{aligned}, \tag{8}$$

де A – інтенсивність збільшення кількості опорів копанню, яка визначається видом та категорією ґрунту.

Величина тягового зусилля визначається зчіпною вагою машини та коефіцієнтом зчеплення φ :

$$\begin{aligned} T &= T_1 + T_2 + T_3; \\ T &= (G_1 + G_2 - R_B) \varphi. \end{aligned} \quad (9)$$

Математичну модель напівпрічипного скрепера запишемо так:

$$\begin{aligned} m_1 \cdot x_1 + m_1 h_1 \varphi_1 &= T_{11} + T_{12} - F_{11} - F_{12} - \\ &- U_{11}(x_1 - x_2) - U_{12}(y_1 - y_2), \\ m_1 \cdot y_1 + m_1 l_{1m} \varphi_1 &= -C_1 y_1 + C_1 [(l_{11} + l_{1m}) - (l_{12} - l_{1m})] \dot{c}. \\ \varphi_1 - k_1 y_1 + k_1 [(l_{11} + l_{1m}) - (l_{12} - l_{1m})] \dot{c} &+ \\ &+ U_{21}(x_1 - x_2) + U_{22}(y_1 - y_2), \\ m_1 h_1 x_1 + m_1 l_{11} y + [m_1 (h_1^2 + l_{1m}^2) + J_1] \varphi_1 &= \\ &= -C_1 (l_{11} + l_{1m}); \\ y_1 + C_1 (l_{11} + l_{1m})^2 \varphi_1 - k_1 (l_{11} + l_{1m}) y_1 + \\ &+ k_1 (l_{11} + l_{1m})^2; \\ \varphi_1 - C_1 (l_{12} + l_{1m}) y_1 + \\ &+ C_1 (l_{12} + l_{1m})^2 \varphi_1 - k_1 (l_{12} + l_{1m}); \\ y_1 + k_1 (l_{12} + l_{1m})^2 \varphi_1 + F_{11} h_{1m} + \\ &F_{12} h_{1m} - T_{11} h_{1m} - T_{12} h_{1m}; \\ m_2 \cdot x_2 + m_2 h_2 \varphi_2 &= T_2 - R_G - F_{21} + U_{11}(x_1 - x_2) + \\ &+ U_{12}(y_1 - y_2), \\ m_2 \cdot y_2 + m_2 (l_{22} - l_{23}) \varphi_2 &= \\ &= -C_2 y_2 + C_2 l_{22} \varphi_2 - k_2 y_2 + \\ &+ k_2 l_{22} \varphi_2 - U_{21}(x_2 - x_1) - U_{22}(y_2 - y_1) + R_B, \\ m_2 h_2 x_2 + m_2 (l_{22} - l_{23}) y_2 + [m_2 (h_2^2 + l_{2m}^2) + J_2] \varphi_2 &= \\ &= C_C (x_3 - x_2) h_2 + C_2 l_{22} y_2 + C_2 l_{22}^2 \varphi_2 + \\ &+ k_2 l_{22} y_1 - k_2 l_{22}^2 \varphi_2 + F_{21} h_{2m} + R_G h_{21} + R_B l_{21}. \end{aligned} \quad (10)$$

Під час моделювання режимів навантаження були використані граничні умови, які враховували низку обмежень на дію сил опору копанню та руху і реакцій ґрунту на колесах.

Пружна сила проявляється тільки в процесі стискання пневматичних шин:

$$R_i = \begin{cases} c_i y_i & y_i > 0 \\ 0 & y_i \leq 0 \end{cases}. \quad (11)$$

Сила опору пересуванню діє, якщо $R_i > 0$:

$$F_i = \begin{cases} R_i f & R_i > 0 \\ 0 & R_i \leq 0 \end{cases}. \quad (12)$$

Горизонтальна та вертикальна сили опору різанню ґрунту:

$$\begin{aligned} R_G &= \begin{cases} R_G & x > 0 \\ 0 & x \leq 0 \end{cases}; \\ R_B &= \psi R_G. \end{aligned} \quad (13)$$

У процесі досліджень розглядалися умови, за яких була відсутня передача крутного моменту на задню вісь скрепера, тобто тягове зусилля забезпечував тільки тягач, а також різне співвідношення розподілу сил тяги між тягачем і скрепером.

Під час досліджень було визначено, що горизонтальні сили, які викликають повздовжні коливання моделі, перевищують вертикальні.

Вид графіків коливань майже однаковий в обох напрямках, а максимальні значення зусиль досягаються на початку процесу (рис. 2).

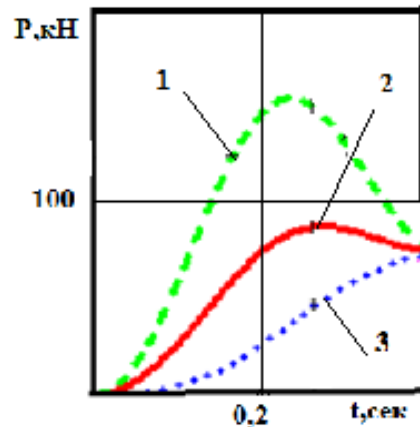


Рис. 2. Результати моделювання процесів навантаження тягової: 1 – скрепер з переднім приводом, $T_1 = 100\%$, 2–3 – скрепер з повним приводом, $T_1 = 70\%$, 50% загальної сили тяги

Найбільші зусилля виникають під час роботи скрепера з переднім приводом, вони мають швидкий темп зростання, а коефіцієнт динамічності дорівнює 1,9.

Під час під'єднання заднього приводу темп і величина навантажень, що виникають, зменшуються, а коефіцієнт динамічності дорівнює 1,1–1,5 за умови реалізації задньою віссю скрепера 30 та 50 % загальної сили тяги, відповідно.

Під час передачі на задню вісь 70 % загальної сили тяги дещо змінюється тип коливальних процесів, зокрема збільшується амплітуда, темп і максимальні значення майже не змінні.

Таким чином, робота напівпрічипного скрепера з повним приводом призводить до

зменшення навантаження тягової рами, а найбільш прийнятним режимом є варіант рівного розподілу тягового зусилля між трактором і скрепером.

З метою визначення впливу категорії та типу ґрунту, що розробляється, на величину зусиль, що діють у тяговій рамі, були проведені дослідження залежності навантаження від співвідношення сили тяги скрепера T_2 і трактора T_1 та інтенсивності збільшення опору копанню A .

Під час досліджень було визначено, що зі зменшенням категорії ґрунтів пропорційно зменшуються сили, що діють у тяговій рамі.

Тип кривих підтверджує висновки, які були зроблені під час аналізу процесів навантаження, зокрема про те, що рівномірний розподіл тягових зусиль між тягачем і скрепером є найбільш раціональним. Доказом цього свідчення є обмеженість технічних можливостей досягти більш суттєвого перерозподілу сили тяги між передніми та задніми колесами.

Висновки

Розроблено розрахункову схему напівпричипного скрепера з усіма провідними колесами, на основі якої з урахуванням обґрунтованих обмежень і граничних умов створено двомасову математичну модель, яка має можливість руху в трьох напрямках.

У процесі моделювання визначено, що поздовжні деформації металокопункції значно перевищують вертикальні.

Процеси навантаження мають однаковий тип, а зусилля в тяговій рамі скрепера з провідними передніми колесами на 21–46 % перевищують ті, що діють у машині з усіма тяговими.

Найбільш раціональним є режим роботи, під час якого сила тяги розподіляється порівну між тягачем і скрепером, що дає найменші зусилля, що діють, а коефіцієнт динамічності дорівнює 1,2.

Отримані результати можуть бути використані для ґрунтів різної категорії, які визначаються інтенсивністю збільшення опору копанню від 100 до 250 кН/м. Таким чином, використання напівпричипних скреперів з усіма тяговими колесами дозволяє суттєво зменшити навантаження тягової рами та збільшити ефективність роботи.

Література

1. Сукач М. К. Будівельні машини та обладнання. Київ, 2022. 390 с.

2. Кузенко Л. М., Вантух З. З. Дорожно-будівельні машини: навч. посібник. Київ: Кондор, 2021. 236 с.
3. Лук'ячук О. П., Тимейчук О. Ю. Дослідження робочих процесів машин та методи їх оптимізації: навч. посібник. Рівне, 2021. 240 с.
4. Папінко А.І. Дослідження деформовано-напруженого стану несучої рами напівпричипів. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки: наук. зб. Кропивницький: ЦНТУ, 2025. Вип. 12(43). Ч. 2. С. 258–265.* <https://dspace.kntu.kr.ua/items/05f71a0a-13d8-4d88-8469-a2bc97f9a6365>
5. Ковалевський С. Г. Дослідження навантаження скрепера з усіма провідними колесами трансмісії. *Наукові вісті Давіського університету.* 2020. №18. С. 22–27. http://nvdu.snu.edu.ua/wp-content/uploads/2020/02/index_2020_18.pdf
6. Ковалевський С. Г., Ярижко О. В. Дослідження напружень у металокопункції тягової рами напівпричипного скрепера. *Підійомно-транспортна техніка.* 2019. № 2 (61). С. 93–103. <https://ptt-journals.net/article/2-61-2019-08/>
7. Роговий А. С. Використання методів числового вирішення задач інженерного аналізу: навч. посібник. Харків: ХНАДУ, 2019. 112 с.
8. Shao-HuiTangNew soil abrasion testing method for evaluating the influence of geological parameters of abrasive sandy ground on scraper wear in TBM tunneling / *Tunnelling and Underground Space Technology*Volume 128, October 2022. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0886779822002449>
9. Nian-En Yi, Yang YangImpact of key factors on shield scraper performance in gravelly soil strata: DEM and experimental investigations / *Computers and Geotechnics, Volume 174, October 2024.* Vol. 174. P. 186–191. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0266352X2400531710>
10. Shuai Ma, Cong Niu, Chenggong Yan, Haochao Tan, Liming XuDiscrete element method optimisation of a scraper to remove soil from ridges formed to cold-proof grapevines / *Biosystems Engineering*Volume 210, October 2021, P. 156–170. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1537511021001987>

References

1. Sukach, M. K. Budivelnimashynytaobladnannia. Kyiv, 2022. 390 s.
2. Kuzenko, L. M., Vantukh, Z. Z. Dorozhno-budivelnimashyny: navchalnyi posibnyk. K Kyiv: Kondor, 2021. 236 p.
3. Lukianchuk, O. P., Tymeichuk, O.Yu. Doslidzhennia robochych protsesiv mashyn ta metody yik hoptymizatsii: navch.posibnyk, 2021. Rivne. 240 p.
4. Papinko A. I. Doslidzhennia deformovano-napruzenoho stanu nesuchoi ramy napivprychepiv. *Tsentrlnoukrainskyi naukovyi visnyk. Tekhnichninauky :nauk. zb. Kropyvnytskyi: TsNTU, 2025. Vol. 12(43). H. 2. P. 258–265.*

5. Kovalevskiy, S. H. Doslidzhennia navantazhennia skrepera z usima providnymy kolesamy transmisii. Naukovi visti Dalivskoho universytetu. 2020. № 18. P. 22–27.
6. Kovalevskiy, S. H., Yaryzhko, O. V. Doslidzhennia napruzhen v metalokonstruktsii tiahovoi ramy napivprychipnogo skrepera. Pidiomno-transportnatekhnika. 2019. № 2 (61). P. 93–103.
7. Rohovyi, A. S. Vykorystannia metodiv chyslovo-hovy rishennia zadach inzhenerneho analizu: navc. posibnyk. Kharkiv: KhNADU, 2019. 112 p.
8. Shao-HuiTangNew soil abrasion testing method for evaluating the influence of geological parameters of abrasive sandy ground on scraper wear in TBM tunneling / Tunnelling and Underground Space Technology Volume 128, October 2022.
9. Nian-En Yi, Yang Yang Impact of key factors on shield scraper performance in gravelly soil strata: DEM and experimental investigations/ Computers and Geotechnics, Volume 174, October 2024. Vol. 174. P. 186–191.
10. Shuai Ma, Cong Niu, Chenggong Yan, Haochao Tan, Liming Xu Discrete element method optimisation of a scraper to remove soil from ridges formed to cold-proof grapevines / Biosystems Engineering. Volume 210, October 2021, P. 156–170.

Ковалевський Сергій Германович, к.т.н.,

доцент кафедри будівельних і дорожніх машин,
тел.: +380(97)240 71 80, 2407180@ukr.net

Бугасенко Дмитро Володимирович, аспірант
кафедри будівельних і дорожніх машин,
тел.: +380(93) 842 3880, d.bugaenko86@gmail.com

Чорний Євген Євгенович, аспірант кафедри
будівельних і дорожніх машин,
тел.: +380 97 430 14 64

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

Research on the load of a pneumatic wheel scraper

Abstract. *Problem. Semi-trailer and self-propelled construction machines are widely used in earthmoving operations: scrapers, trench excavators, utility trenchers, as well as in the transportation of various construction materials: dump trucks, bitumen and cement trucks. A characteristic feature of these machines is the transfer of part of the weight of the working equipment to the base tractor, which increases the traction properties of the machine as a whole. Experience with pneumatic-tired scrapers has shown that it is impossible to fully load soil into the bucket without using additional tractors or forced mechanisms. Among the many ways to increase the efficiency of scrapers, one of the most common is the use of all-wheel drive machines, in which torque is transmitted to the rear axle from the main or auxiliary engine, which allows increasing the degree of bucket filling, reducing the distance and time of digging, but leads to a change in the loads acting on the metal structure components of the scraper. Thus, the need to improve the efficiency of pneumatic-wheel*

scrapers with all-wheel drive by using rational operating modes and determining the load patterns on the metal structure of the scraper based on the created calculation scheme and mathematical model is a pressing task. Goal. Determination of the load patterns on the metal structure of a semi-trailer scraper with rear axle drive and rational distribution of traction forces between the tractor and the scraper. Methodology. The analysis of the design and operating conditions of scrapers allowed us to identify the limitations that were used in drawing up the diagram. The traction frame, which has the lowest rigidity among other metal structure components, was used as the elastic element. When modeling load modes, boundary conditions were used that took into account a number of restrictions on the action of forces resisting digging and movement, as well as soil reactions on the wheels. Results. The simulation showed that the longitudinal deformations of the metal structure significantly exceed the vertical ones. The loading processes are similar, but the forces in the traction frame of the scraper with front-wheel drive exceed those in the machine with all-wheel drive by 21–46%. The most rational operating mode is considered to be the one in which the traction force is distributed equally between the tractor and the scraper, which gives the smallest acting forces, and the dynamic coefficient is equal to 1.2. Originality. A calculation scheme for a semi-trailer scraper with all drive wheels has been developed, on the basis of which, taking into account reasonable restrictions and boundary conditions, a two-mass mathematical model capable of moving in three directions has been created. Practical value. The results obtained can be used for soils of various categories, characterized by an intensity of resistance to digging ranging from 100 to 250 kN/m. Thus, the use of semi-mounted scrapers with all-wheel drive significantly reduces the load on the traction frame and increases work efficiency.

Keywords: *scraper; modeling; workflow; load; metal structure; drive wheels*

Kovalevskiy Serhii, PhD, Associate Professor, Department of construction and road machines,
ORCID: 0000-0002-6299-2223,
2407180@ukr.net

Bugayenko Dmitry, graduate student, Department of construction and road machines,
ORCID: 0009-0008-8367-5906,
d.bugaenko86@gmail.com

Chernyi Eugen, graduate student, Department of construction and road machines,
ORCID: 0009-0003-0189-7040,
Evgeniy.chorniyuy@gmail.com

Стаття надійшла до редакції / Received: 17.01.2026.

Прийнята до друку після рецензування / Revised and Accepted: 25.01.2026.

Дата публікації статті / Published: 11.05.2026.