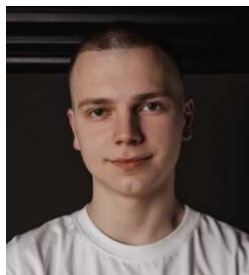


УДК 001.891.57:621.879.4
UDC 001.891.57:621.879.4

DOI: 10.33744/0365-8171-2022-111-269-276

МОДЕЛЮВАННЯ РОБОЧИХ ПРОЦЕСІВ ІННОВАЦІЙНИХ ЗЕМЛЕРИЙНИХ МАШИН БЕЗПЕРЕРВНОЇ ДІЇ

WORKING PROCESSES MODELING FOR INNOVATIONAL CONTINUOUSLY OPERATING EARTHMOVING MACHINES



Пацьора Данило Іванович, Національний транспортний університет, магістрант кафедри інженерії машин транспортного будівництва, e-mail: dpatsora@gmail.com, тел.: +380996460618,

<https://orcid.org/0000-0001-9515-3672>.



Томашевська Марина Сергіївна, Національний транспортний університет, аспірантка кафедри інженерії машин транспортного будівництва, e-mail: kandrsigma@i.ua, тел.: +380937766487,

<https://orcid.org/0000-0002-7346-2826>

Анотація. У статті розглянуто питання підвищення ефективності роботи інноваційних конструкцій безківшевих роторних робочих органів землерийних машин безперервної дії шляхом удосконалення процесів розвантаження роторів від розробленого ґрунту. Розроблено та виготовлено фізичну модель запропонованої конструкції робочого органа безківшевого типу з двохступеневим лотковим розвантаженням можливістю зміни конструкції розвантажувального вузла в процесі виконання досліджень. Відпрацьована в процесі виконання досліджень методика модельних випробувань та експериментальне обладнання, дозволять виконати необхідний комплекс випробувань для побудови регресійних рівнянь досліджуваного процесу та оптимізації конструкції лоткового розвантажувального вузла.

Ключові слова: землерийна машина, моделювання, робочий процес, ґрунт, стенд, подібність.

Вступ та актуальність проблеми

Підвищення ефективності виробництва та якості машинобудівної продукції на базі впровадження у виробництво нової техніки, автоматизованих та роботизованих комплексів машин є одним з визначальних напрямків розвитку машинобудування. Досягнення ефекту інтенсифікації робочих процесів дорожньо-будівельних машин можливе шляхом реалізації високих темпів виконання необхідних наукових досліджень та своєчасної реалізації їх результатів.

Створення новітніх дорожньо-будівельних, в тому числі землерийних машин безперервної дії, з використанням традиційних та інноваційних способів взаємодії робочого обладнання з ґрунтовим середовищем, а також досягнень фундаментальних наук визначають основні напрямки розвитку будівельного та дорожнього машинобудування. В галузі землерийного машинобудування постала проблема створення вискоєфективних універсальних землерийних машин безперервної дії та траншейних машин різного технологічного призначення, продуктивність яких в рази більше відомих конструкцій.

В зв'язку з об'єктивною наявністю великої різноманітності окремих машин та обладнання, що входить до складу дорожньо-будівельного комплексу найбільш важливими задачами слід вважати розробку методів створення сучасної мехатронної техніки на базі досягнень фундаментальних наук.

використання досягнень в суміжних та віддалених областях науки і техніки, підвищення темпів пошуку нових технічних рішень та їх реалізації.

Реалізація вказаних положень в інженерній практиці потребує наукової організації процесу створення нової техніки, що базується на основі системного аналізу як наукової фундаментальної розробки необхідних первинних схемотехнічних рішень [1]. Зміст системного аналізу, в процесі створення нової техніки, включає в себе питання форсування комп'ютерних методів формалізації складних невизначених задач та їх представлення для вирішення з використанням сучасної обчислювальної техніки та з залученням до вирішення вказаної проблеми методів моделювання.

Метою досліджень є розробка методології визначення на фізичній моделі оптимальних режимів роботи та конструктивних параметрів інноваційних робочих органів землерийних машин безперервної дії, ефективності двохступеневого розвантаження, силових і енергетичних показників навантаження роторних робочих органів і машин в цілому з використанням методів теорії подібності та фізичного моделювання.

Аналіз результатів виконаних досліджень та публікацій. В енергетиці, гідротехнічному будівництві, авіації, дорожньому та будівельному машинобудуванні фізичне моделювання, як метод наукових досліджень використовується досить широко [2-4]. Особливо це характерно для дослідження систем і процесів для яких структура і склад рівнянь, що їх описують, не є чітким і до кінця зрозумілим.

Створенню основ подібності і фізичного моделювання присвячена значна кількість робіт [5-7], що мають фундаментальний характер. Використання їх результатів дозволило досягти значного прогресу в розробці та удосконаленні методів фізичного моделювання робочих процесів дорожньо-будівельних машин, в тому числі землерийних машин безперервної дії [8-10].

Однак, до сьогоднішнього дня не вирішено цілий ряд фундаментальних питань створення та оптимізації конструкцій і робочих процесів спеціальних землерийних машин безперервної дії, робочі процеси яких мають тільки їм притаманні особливості [8]. В першу чергу це стосується універсальних землерийних машин безперервної дії здатних одним і тим же робочим органом без його переналагоджування відкопувати в ґрунті протяжні виїмки змінної ширини та глибини, а також траншейних машин, що розробляють ґрунт та переміщують його із забою на розвантаження суцільним потоком, а не окремими порціями та без обмеження швидкостей різання ґрунту.

Об'єктом дослідження, є інноваційні роторні робочі органи універсальних землерийних машин безперервної дії і траншейних машин підвищеної продуктивності, а також їх взаємодії з розроблюваним ґрунтовим середовищем.

Результати досліджень і пояснення. Вихідною конструкцією під час проведення модельних експериментальних досліджень безківшевих роторних робочих органів траншейних екскаваторів є машина ЕТР-134, характерний представник машин безперервної дії обладнаних безківшевим роторним робочим органом (рис. 1). Екскаватор призначений для відкопування траншей прямокутного профілю, глибиною до 1,3 м і шириною 0,28 м в немерзлих ґрунтах до IV категорії включно і ґрунтів сезонного промерзання з міцністю на поверхні до 200 ударів по ударнику ДорНДІ. Може використовуватись для прокладання ліній зв'язку вздовж траси автомобільних, або залізних доріг, для будівництва інших протяжних підземних транспортних комунікацій.

Робочий орган екскаватора (рис. 2) включає ротор 1 з приводом, раму ротора 2, ґрунтоочисники 3, бермоутворювачі 4, зачисний башмак 5. Ротор являє собою диск, центральна вісь якого спирається на підшипники, встановлені на рамі ротора. З одного боку диска кріпиться зубчастий вінець, за допомогою якого через редуктор від гідромотора забезпечується привод обертання ротора. По обидва боки диска ротора закріплені циліндричні барабани 6, що утворюють разом з нерухомими боковинами 7 ротора, встановленими на рамі, закриту порожнину його приводу. До диску ротора по його периметру у визначеному порядку приварено траверси 8 зі встановленими на них ріжучими елементами 9.

Рама ротора являє собою зварену конструкцію, що складається з двох поздовжніх балок коробчастого перетину, з'єднаних поперечиною. На рамі встановлені ґрунтоочисники, що вилучають ґрунт з внутрішніх кільцевих порожнин ротора, при його розвантаженні консольна частина яких, розташована на деякій відстані від поздовжньої вісі робочого органу. Консолі ґрунтознімачів утворюють собою бермоутворювачі, що слугують для переміщення вилученого з ротора ґрунту бокові у відвали на задану відстань від траншеї.



Рисунок 1 – Екскаватор ЕТР-134.

Figure 1 – ETR-134 excavator.

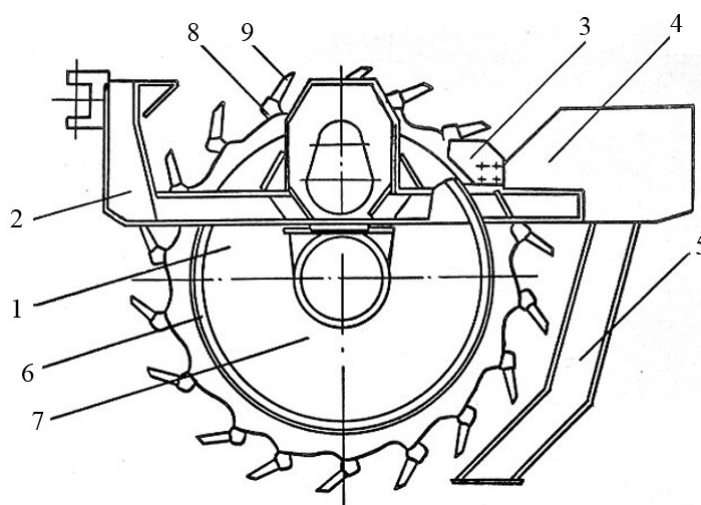


Рисунок 2 – Безківшевий робочий орган траншейного екскаватора: 1 – ротор; 2 – рама ротора; 3 – ґрунтоочисник; 4 – бермоутворювач; 5 – зачисний башмак; 6 – барабан; 7 – боковина ротора; 8 – траверса; 9 – ріжучий елемент

Figure 2 – Bucketless implement of the rotary excavator: 1- rotor, 2 – rotor frame; 3 – soil remover crossarm; 4 - berm maker; 5 – clean-up bearing plate; 6 – shell; 7 – rotor sidewall; 8 – crossarm; 9 – cutter

Розглянута конструкція робочого органу екскаватора являє собою безківшевий ротор, що здатен транспортувати розроблений ґрунт із забою безперервним потоком, а не окремими порціями і не має при копанні ґрунту обмежень швидкості різання.

До завдань експериментальних досліджень, що визначають їх зміст, входить визначення:

- параметрів силового навантаження вихідної конструкції робочого органу екскаватора, а саме: сили тяги на роторі T , крутного моменту на валу його приводу $M_{кр}$, сили тяги що витрачається на роботу бермоутворювачів T_b і поздовжніх навантажень на раму ротора T_p ;

- параметрів силового навантаження і енергетичних характеристик робочого процесу безківшевого роторного робочого органа з рекомендованою конструкцією двохступеневого лоткового розвантажувального вузла.

В якості основного методу при проведенні цих досліджень обрано метод подібності і фізичного моделювання.

У процесі досліджень варіюються значення конструктивних параметрів досліджуваної моделі робочого органа та режими його роботи. При цьому дотримуються основні положення теорії подібності та фізичного моделювання [2]. Масштаб моделювання лінійних величин вибрано рівним п'яти, тобто $C_l = 5$. Масштабні коефіцієнти перерахунку від параметрів "моделі" на "натуру". отримано в процесі виконання експериментальних досліджень в даному напрямку, що проводились на кафедрі дорожніх машин НТУ і приведено в [8].

Забезпечення необхідних "модельних" швидкостей різання ґрунту і подачі робочого органу на забій досягається шляхом регулювання відповідних гідрооб'ємних приводів випробувального стенду. Ідентичність геометричних параметрів "моделі" досліджуваного робочого органу "натурі", при вибраному масштабі моделювання лінійних величин, забезпечується при її виготовленні. Розглядаючи процес моделювання досліджуваної системи як наближений, в якості основного, при моделюванні ґрунтових середовищ, прийнятий метод еквівалентних матеріалів [6], при цьому використовується методика виготовлення модельних ґрунтів, розроблена на кафедрі дорожніх машин НТУ [8]. Приймаючи в якості вихідного типу "натурного" ґрунту суглинки, необхідні, або близькі до даного ґрунтового середовища, значення фізико-механічних параметрів його моделі отримані для наступного складу: річковий пісок – 75 %, молота глина – 20 %, моторна олива – 5 %

Виготовлення моделі ґрунту проводиться шляхом ретельного перемішування вказаних вище компонентів з метою надання суміші однорідності. Суміш укладається в ґрунтовий канал і здійснюється її пошарове ущільнення. Контроль фізико-механічних властивостей ґрунту при цьому здійснюється відомими приладами: ударником ДорНДІ, та щільноміром-вологоміром Н.П.Ковальова. Розкид значень фізико-механічних характеристик модельного ґрунту, викладеного і ущільненого в каналі не перевищує 12-15 %.

Модель робочого органу екскаватора ЕТР-134, виконана в масштабі 1:5 (рис. 3), включає в себе ротор 1 з приводом, раму робочого органу 2, ґрунтоочисники 3 з бермоутворювачами 4, зачисний башмак 5. Вісь центрального диска ротора встановлена в підшипникових опорах кронштейнів 6. По периметру диска ротора розташовані траверси 7 з ріжучими елементами 8, схема розстановки яких аналогічна схемі на натурній машині.

Привод ротора складається з аксіально-плунжерного гідромотора ланцюгової передачі і одноступінчатого редуктора приводу ротора. Останній включає зубчастий вінець, жорстко закріплений на диску ротора і насаджено на привідному валу шестерню, котрими передається крутний момент від гідромотора через ланцюгову передачу і вал приводу безпосередньо на робочий орган. Редуктор закритий циліндричними барабанами та нерухомими боковинами, що кріпляться до кронштейнів підвіски ротора.

Вимірювальними елементами при проведенні експериментальних досліджень є стандартні промислові тензорезистори, що наклеюються у відповідних місцях конструкцій вимірювальних пристроїв. Крутний момент на валу привода ротора вимірюється з допомогою тензометричного датчика тиску, встановленого в напірній магістралі гідродвигуна приводу ротора.

Сила тяги T , прикладена до робочого органу, вертикальна та бокова складові сил копання ґрунту робочим органом вимірюються з використанням спеціальної тензопідвіски [11].

Нормальні сили T_b , що діють на бермоутворювачі зі сторони переміщуваного у відвал ґрунту заміряються за допомогою тензобалок, на яких змонтовано кожен бермоутворювач.

Фіксація швидкості подачі ротора V_e здійснюється датчиком швидкості переміщення, змонтованим на стенді.

Швидкість різання ґрунту V_p ріжучими елементами робочого органу фіксується фотоелектричним датчиком встановленим в приводі моделі ротора.

Рама моделі робочого органу є виконаною в масштабі 1:5 конструкцією, що ідентична по конфігурації рамі натурної машини ЕТР-134. В задній частині рами розташовані ґрунтоочисники ротора з бермоутворювачами. Останні змонтовані на кронштейні, що дозволяє змінювати конструкцію та лінійні розміри бермоутворювачів в процесі проведення досліджень.

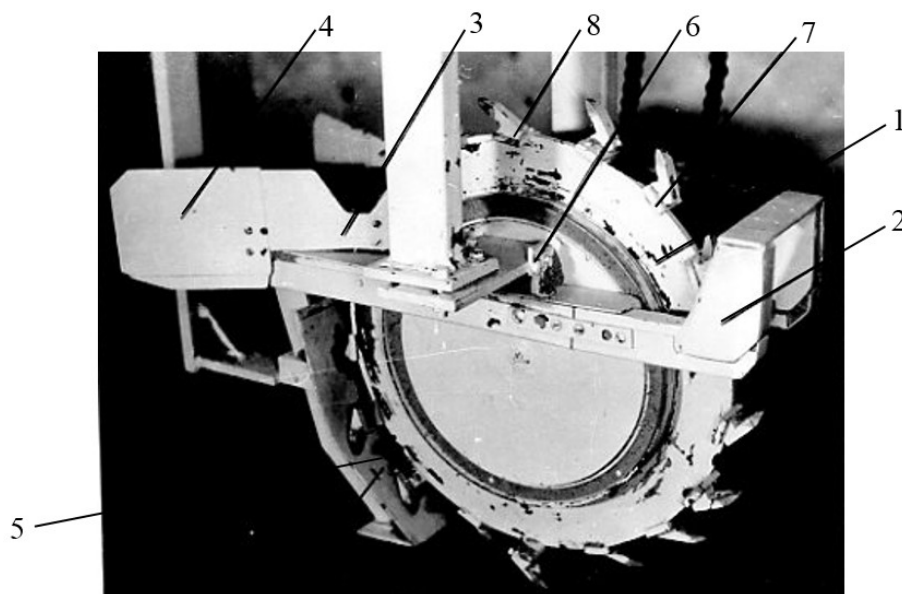


Рисунок 3 – Модель базової конструкції робочого органа: 1 – ротор; 2 – рама; 3 – ґрунтоочисник; 4 – бермоутворювач; 5 – зачисний башмак; 6 – кронштейн; 7 – траверса; 8 – ріжучий елемент

Figure 3 – Model of the basic design of implement: 1 – rotor, 2 – rotor frame; 3 – soil remover crossarm; 4 – berm maker; 5 – clean-up bearing plate; 6 – bracket; 7 – crossarm; 8 – cutter

Для виконання роботи використовувалась також модель цього ж робочого органа з запропонованою конструкцією лоткового розвантажувального вузла, що відрізняється від вище описаної тим, що на ній відсутня передня перемичка рами, на місце якої встановлено лотковий розвантажувальний вузол (рис. 4). Конструкцію виконано у відповідності до розробленого в ході виконання теоретичних досліджень технічного рішення. Вона складається з основи лотка 1, передньої 2 і задньої 3 стінок, ґрунтознімача 4, захисного кожуха 5. Передня стінка кожного лотка монтується з можливістю її пересування для зміни ширини лотка в процесі виконання досліджень пошуку раціональної конструкції розвантажувального вузла. Ґрунтознімачі встановлюються на тензометричному кронштейні 6, що забезпечує його переміщення по твірній центрального барабана ротора з можливістю зміни кута установки ґрунтознімача до центрального диска ротора. Функцію задньої стінки лотка розвантажувального вузла ротора виконує твірна 7. Переріз потоку ґрунту, що переміщується по лотку розвантажувального вузла у відвал, може змінюватися варіацією параметрів установки передньої стінки лотка і його ґрунтознімача.

Експериментальні дослідження моделей безківшевих роторних робочих органів виконуються на спеціальному стенді фізико-математичного моделювання робочих процесів землерийних машин встановленому на ґрунтовому каналі кафедри інженерії машин транспортного будівництва НТУ [8].

Фіксація вимірюваних параметрів, що характеризують досліджувані режими роботи моделі робочого органа, параметри силового навантаження фіксуються спеціальним вимірювальним тензометричним комплексом КДН.01 з допомогою якого здійснюється також перетворення сигналів від тензодатчиків у цифровий вигляд, та реєстрація отриманої інформації на цифровому носії для подальшого зчитування та обробки.

Одночасно з тензометричними вимірами, здійснюється відео фіксація робочого процесу досліджуваного робочого органу.

Проведення тензометричних досліджень спільно з відеофіксацією дозволяє більш повно представити особливості робочого процесу досліджуваного робочого органу, пояснити їх і підвищити якість експерименту.

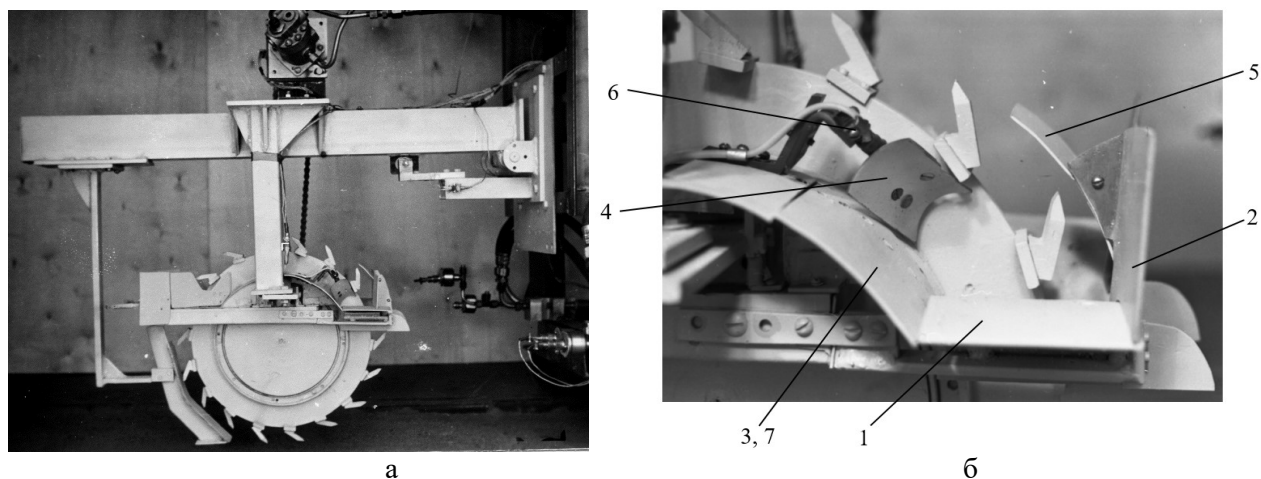


Рисунок 4 – Модель лоткового розвантажувального вузла: а) загальний вигляд робочого органу на стенді; б) лотковий розвантажувальний вузол: 1 – основа лотка; 2 – передня стінка; 3 – задня стінка; 4 – ґрунтознімач; 5 – захисний кожух; 6 – тензометричний кронштейн; 7 – задня стінка вузла

Figure 4 – Model of the tray unloading unit: a) general view of the implement on the stand; b) tray unloading unit: 1 - tray base; 2 - front wall; 3 - back wall; 4 - soil remover; 5 - protective cover; 6 - strain gauge bracket; 7 - rear wall of the node

При проведенні експериментальних досліджень на моделях робочого органу, вимірюються: сила тяги T на переміщення ротора, крутний момент на валу приводу ротора $M_{кр}$, нормальна складова T_{σ} навантаження на бермоутворювач і поздовжнє навантаження на раму ротора T_p . Зміна параметрів навантаження при постійній глибині копання 1,3 м фіксується при варіюванні швидкостей різання V_p і подачі V_e в діапазоні 1,7-2,58 м/с та 100-500 м/год. відповідно (значення силових, лінійних і кінематичних параметрів наведені в перерахунку на "натуру"). Вибір швидкостей різання і подачі обумовлено аналогічними характеристиками базового екскаватора.

Ефективність досліджуваного робочого органу з лотковим розвантажувальним вузлом значною мірою характеризується його оптимальними геометричними параметрами, що визначаються відповідними конструктивними факторами. Оцінка впливу кожного з цих факторів на процес розвантаження окремо не може дати достовірної картини, тому що ускладнено виявлення їх взаємовпливу на досліджувані характеристики робочого органу. Тому, для визначення оптимальних геометричних параметрів розвантажувального вузла проводиться плановий експеримент з метою отримання математичної моделі процесу розвантаження.

В якості параметрів оптимізації (вихідні параметри $\bar{y}_i$) приймаються сила тяги T і крутний момент $M_{кр}$ ($\bar{y}_1$ і $\bar{y}_2$). Одночасно для визначення ступеня впливу геометричних параметрів розвантажувального вузла безпосередньо на процес розвантаження робочого органу фіксується ступінь очищення ротора C ($\bar{y}_3$). Незалежними змінними в процесі виконання експериментальних досліджень приймаються: кут установлення ґрунтознімача α , висота установки ґрунтознімача $H_{гр}$, ширина лотка B , обумовлена місцем розташування передньої стінки. Математичну модель досліджуваного процесу можна в загальному вигляді представити у вигляді функціональної залежності між структурними компонентами:

$$\bar{y} = f(\alpha, B, H_{гр}). \quad (1)$$

Для визначення наведеної функціональної залежності в явному вигляді, тобто отримання регресійних рівнянь, застосовується, відповідно до загальноприйнятих методик, плановий експеримент з числом дослідів N :

$$N = \gamma^K, \quad (2)$$

де γ – кількість рівнів, K – кількість факторів.

У нашому випадку здійснюється повний факторний експеримент на двох рівнях типу 2^K , тобто 2^3 .

Мінімально необхідне число дослідів встановлюється в результаті статичного аналізу і визначається з урахуванням величини коефіцієнта варіації $k_{\text{вар}}$, і необхідного ступеня точності результату ε . Для проведеного дослідження, у відповідності з загальноприйнятими методиками, приймається точність результатів $\varepsilon = 0,12$ і задана надійність (показник достовірності результатів) $P = 0,95$.

Висновки та рекомендації.

1. З метою підвищення ефективності роботи безківшевого роторного робочого органа траншейного екскаватора запропоновано спосіб та розроблено конструкцію додаткового лоткового розвантажувального вузла ротора.

2. Виготовлено фізичну модуль ротора з двохступеневим лотковим розвантаженням та можливістю зміни в процесі виконання досліджень його визначальних конструктивних параметрів.

3. Розроблена в процесі виконання роботи методика виконання досліджень ефективності двохступеневого розвантаження безківшевих роторних робочих органів дозволяє визначити оптимальні параметри конструкції лоткового розвантажувального вузла ротора шляхом побудови регресійної моделі процесу розвантаження та його аналізу.

Перелік посилань.

1. Хмара Л. А., Кравець С. В., Нічке В. В., Назаров Л. В., Скоблюк М. П., Нікітін В. Г. Машины для земляных работ: навч. посіб. Рівне – Дніпропетровськ – Харків, 2010. 557 с.
2. Алабушев П.М., Геронимус В.Б., Минкевич Л.М., Шеховцев Б.А. Теория подобия и размерностей. Моделирование. Москва. 1968. 206 с.
3. Веников В.А. Теория подобия и моделирования. М. 1976. 479 с.
4. Баловнев В.И. Методы физического моделирования рабочих процессов дорожно-строительных машин. Москва. 1974. 232 с.
5. Седов Л.И. Методы подобия и размерности в технике. Москва. 1977. 440 с.
6. Баловнев В.И. Моделирование процессов взаимодействия со средой рабочих органов дорожно-строительных машин. Москва. 1981. 335 с.
7. Аврун Г.А., Кириченко І.Г., Мороз І.І. Основи об'ємного гідропривода і гідропневмоавтоматики: навч. посіб. Харків. 2009. 424 с.
8. Мусійко В.Д., Коваль А.Б. Теорія та створення інноваційних землерийних машин безперервної дії: монографія. Видання друге, доповнене. Київ. 2018. 282 с.
9. Кириченко І. Г., Назаров Л. В., Нічке В. В., Демішкан В. Ф., Приходько В. І. Наукові основи створення високоефективних землерийно-транспортних машин: навч. посіб. Хорків. 2003. 588 с.
10. Мусійко В.Д. Фізико-математичне моделювання робочих процесів землерийних машин безперервної дії. Вісник НТУ. Вип. 1(31). – Київ: НТУ, 2015. –С. 385-394.
11. Патент України № 111690. Дмитриченко М.Ф., Мусійко В. Д., Білякович М.О., Коваль А.Б., Вошак Ю.В., Кучер О.П., Горковенко О.В. Універсальна тензопідвіска та спосіб для визначення силових параметрів просторових навантажень робочих органів землерийних машин.

WORKING PROCESSES MODELING FOR INNOVATIONAL CONTINUOUSLY OPERATING EARTHMOVING MACHINES

Patsora Danulo I., National Transport University, graduate students department of the transport construction machines engineering, e-mail: dpatsora@gmail.com, tel. +380996460618, <https://orcid.org/0000-0001-9515-3672>

Tomashevska Maryna S., National Transport University, Doctoral Student department of the transport construction machines engineering, e-mail: kandrsigma@i.ua, тел.: +380937766487, <https://orcid.org/0000-0002-7346-2826>

Abstract. The article considers the question of the performance increase of the innovative constructions of the bucketless rotary implements of the continuously operating earthmoving machines by improving the process of the rotor discharge from the excavated soil. The physical model has been designed and produced for the proposed design of the bucketless implement with the two-stage tray discharge and a possibility to change the design of the discharge assembly in the process of the study. The model testing methodology and experimental equipment used in this study will allow the perform the necessary set of tests to create the regression equations of the studied process and for optimization of the tray discharge assembly design.

Keywords: earthmoving machine, modeling, work process, soil, test facility, similitude

References

1. Khmara L. A., Kravets S. V., Nichke V. V., Nazarov L. V., Skobliuk M. P., Nikitin V. H. Mashyny dlia zemlianykh robot (Machines for earthworks) Study guide. Rivne – Dnipropetrovsk – Kharkiv, 2010, 557 s. [in Ukrainian].
2. Alabuzhev P.M., Geronimus L.M., Minkevich L.M., Shekhovtsev B.A. Toriya podobiya i razmernostey. Modelirovanie (Theory of similarity and dimensions. Modeling). Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1968. 206 s. [in Russian].
3. Venikov V.A. Toriya podobiya i modelirovaniya (Theory of similarity and modeling). Moscow, Mashinostroenie Publ., 1976. 479 s. [in Russian].
4. Balovnev V.I. Metody fizicheskogo modelirovaniya rabochikh protsesov dorozhno-stroitelnykh mashin (Methods of physical modeling workflows road-building machines). Moscow, Mashinostroenie Publ., 1974. 232 s. [in Russian].
5. Sedov L.I. Metody podobiya i razmernosti v tekhnike (Similarity and dimensional methods in engineering). Moscow, Nauka Publ. 1977. 440 s. [in Russian].
6. Balovnev V.I. Metody fizicheskogo modelirovaniya rabochikh protsesov dorozhno-stroitelnykh mashin (Simulation of interaction processes with the medium of working bodies of road-building machines). Moscow, Vysshaya shkola Publ. 1981. 335 p. s. [in Russian].
7. Avrunin H.A., Kyrychenko I.H., Moroz I.I. Osnovy obiemnoho hidropriyoda I hidropnevmoavtomatyky (Fundamentals volume hydraulic drive and hydraulic pneumatic automation). Kharkiv, KhNADU Publ., 2009. 424 s. [in Ukrainian].
8. Musiiko V. D., Koval A.B. Teoriia ta stvorennia innovatsiinykh zemleryinykh mashyn bezperervnoi dii (Theory and creation of innovative earthmoving machines of continuous action) Kyiv. Vydavnytstvo Ludmyla Publ. 2018. 282 s. [in Ukrainian].
9. Kyrychenko I.H., Nazarov L.V., Nichke V.V., Demishkan V.F, Prihodko V.I. I. Naukovi osnovy stvorennia vysokoefektyvnykh zemleryino-transportnykh mashyn (Scientific bases of creation of highly efficient earthmoving and transport machines). Kharkiv. 2003. 588 s. [in Ukrainian].
10. Musiiko V.D. Phisico-mathematical modeling of the work processes for continuous earthmoving machines. Visnyk National Transport University. – Kyiv. National Transport University. 2014. Vol. 1(31). S. 385-394 [in Ukrainian].
11. Patent Ukrainy № 111690. Dmytrychenko M.F., Musiiko V.D., Biliakovych M.O., Koval A.B., Voshchak Yu.V., Kucher O.P., Horkovenko O.V. Universalna tenzopidviska ta sposib dlia vyznachennia sylovykh parametriv prostorovykh navantazhen robochykh orhaniv zemleryinykh mashyn (Patent of Ukraine № 111690 Universal strain gauge and method for determining force parameters of spatial loads of working bodies of earthmoving machines). [in Ukrainian].