

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ КОПАННЯ ҐРУНТУ ТЕЛЕСКОПІЧНИМ РОБОЧИМ ОБЛАДНАННЯМ ОДНОКІВШЕВОГО ГІДРАВЛІЧНОГО ЕКСКАВАТОРА

Леонід Хмара, Олег Дахно

ДВНЗ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури»
49000, вул. Чернишевського 24-А, м. Дніпропетровськ, Україна, e-mail: olegdakhno@gmail.com

SIMULATION OF SOIL DIGGING OF TELESCOPIC WORKING EQUIPMENT OF HYDRAULIC EXCAVATORS

Leonid Khmara, Oleg Dahno

State university «Pridneprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture»
49000, Chernishevskogo 24a st., Dnipropetrovsk, Ukraine, e-mail: olegdakhno@gmail.com

АНОТАЦІЯ. В статті розглядаються питання, пов'язані з плануванням всебічних багатофакторних експериментальних досліджень процесу копання ґрунту телескопічним робочим обладнанням. Запропонована конструкція спеціального стенда для проведення цих досліджень та розроблена конструкція моделі телескопічного робочого обладнання одноківшевого гідравлічного екскаватора, а також запропоновані рівняння регресії для чотирьох факторів.

Ключові слова: екскаватор, телескопічне робоче обладнання, моделювання робочих процесів.

АНОТАЦІЯ. В статье рассматриваются вопросы, связанные с планированием всесторонних многофакторных экспериментальных исследований процесса копания грунта телескопическим рабочим оборудованием. Предложена конструкция специального стенда для проведения этих исследований и разработана конструкция модели телескопического рабочего оборудования однокорышечного гидравлического экскаватора, а также предложены уравнения регрессии для четырех факторов.

Ключевые слова: экскаватор, телескопическое рабочее оборудование, моделирование рабочих процессов.

ABSTRACT. One of the main directions improvement of building hydraulic excavators there is an increase of the productivity, reduction of the energy expenses for excavation, expansion of technological possibilities, increase of reliability and longevity, and others like that. Expansion of technological possibilities attain, for example, at the expense of using of **telescopic working equipment of excavator**. **Purpose.** To form the plan of experimental researches to identify the physical aspects of the process interaction the model of telescopic working equipment of shovel hydraulic excavator with a develop environment, and also to develop a stand equipment for the multivariate experimental researches and model of telescopic working equipment of shovel hydraulic excavator. **Methodology.** A physical modeling allows to study of new constructive solutions of workings equipment of earth-moving machines (EM) and optimization of their parameters with minimal costs. Methodology of modeling workings processes EM is based on the theory of similarity. It is possible to execute research of digging the telescopic working equipment of shovel hydraulic excavator on the special stand. **Findings.** As a result of the done work is the plan of multivariate experimental researches for detection a physical side of process interaction the model of telescopic working equipment of shovel hydraulic excavator with a develop environment. Proposed equalizations of regression for four factors. Based on equalizations similarity criterion composed conditions of physical modeling the workings processes of telescopic working equipment shovel hydraulic excavator. **Originality** Proposed construction of the special stand for the comprehensive experimental researches of digging the telescopic working equipment of shovel hydraulic excavator, and the developed model of telescopic working equipment of shovel hydraulic excavator with parametric row of buckets.

Key words: excavators, telescopic working equipment, simulation of working processes.

ВСТУП

В теперішній час будівництво є однією з поширених та найбільш дорогих сфер промисловості. Практика будівництва показала, що з підвищенням об'ємів земляних робіт збільшилися і обсяги виробництва машин та різноманітного робочого обладнання для цих робіт.

Одним із головних напрямків удосконалення будівельних гідравлічних екскаваторів є збільшення продуктивності, зниження енерговитрат на розробку ґрунту, розширення технологічних можливостей, підвищення надійності та довговічності, тощо [1-3, 11-14]. Розширення технологічних можливостей досягається, наприклад, за

рахунок можливості змінювати лінійні параметри робочого обладнання.

В традиційних конструкціях робочого обладнання зміни лінійних розмірів досягається за рахунок застосування змінного робочого обладнання (наприклад, змінної рукоятки більшої довжини), але це має ряд недоліків: трудомісткість заміни одного робочого органа іншим, ступінчаста зміна геометричних параметрів при заміні робочого обладнання [2-6].

Екскаратори, оснащені телескопічним робочим обладнанням, а саме телескопічною стрілою та рукояткою, заслуговують особливої уваги [1-3]. Вони мають ряд переваг порівняно з традиційним робочим обладнанням: широкий діапазон зміни лінійних параметрів, при цьому зміна цих параметрів відбувається плавно, а також можливість поєднання робочих операцій з одночасною зміною лінійних розмірів робочого обладнання .

МЕТА РОБОТИ

Формування плану проведення експериментальних досліджень для виявлення фізичної сторони процесу взаємодії моделі телескопічного робочого обладнання одноківшевого гідравлічного екскаватора з розробленим середовищем, а також розробка стендового обладнання для проведення багатофакторних експериментальних досліджень та моделі телескопічного робочого обладнання одноківшевого екскаватора.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Фізичне моделювання дозволяє з мінімальними затратами провести дослідження нових конструктивних рішень робочих органів землерийних машин (ЗМ) та оптимізацію їх параметрів. Методологія моделювання робочих процесів ЗМ базується на теорії подібності. Умови фізичного моделювання робочих процесів ЗМ полягають в наступному:

- визначальні критерії подібності процесу копання ґрунту для моделі та оригіналу повинні бути рівними;

- однойменні фізичні параметри рівнянь, які описують робочий процес та складених для моделі й оригіналу, повинні бути відповідно пропорційними;

- процес взаємодії робочого обладнання із середовищем в моделі та оригіналі повинні належати до одного класу явищ та описуватись однаковою системою рівнянь;

- модель та оригінал робочого обладнання і системи в цілому повинні бути геометрично подібними;

- початкові та кінцеві умови, які характеризують робочий процес моделі, повинні бути подібними відповідним умовам оригіналу.

Для виконання умови подібності процесів, що протікають при взаємодії з середовищем фізичної моделі телескопічного робочого органа (РО), необхідно виконання рівності геометричних та динамічних критеріїв подібності:

$$\begin{aligned} \left(\frac{r}{Y_{\Gamma} \cdot l}\right)_M &= \left(\frac{r}{Y_{\Gamma} \cdot l}\right)_H; \\ \left(\frac{C_{WF}}{Y_{\Gamma} \cdot l}\right)_M &= \left(\frac{C_{WF}}{Y_{\Gamma} \cdot l}\right)_H; \quad \left(\frac{C_{МПП}}{Y_{\Gamma} \cdot l}\right)_M = \left(\frac{C_{МПП}}{Y_{\Gamma} \cdot l}\right)_H; \\ \left(\frac{v^2}{g \cdot l}\right)_M &= \left(\frac{v^2}{g \cdot l}\right)_H; \quad \rho_M = \rho_H; \\ \delta_M &= \delta_H; \quad \alpha_{i(M)} = \alpha_{i(H)}; \quad \left(\frac{l_i}{l}\right)_M = \left(\frac{l_i}{l}\right)_H, \end{aligned}$$

де l_i – деякий лінійний параметр РО; l – визначальний лінійний розмір РО; α_i – кути, які визначають геометрію РО.

На основі рівнянь критеріїв подібності складені умови фізичного моделювання робочих процесів телескопічного РО одноківшевого гідравлічного екскаватора:

$$\begin{aligned} \tau_M &= \tau_H \cdot k_l^{-1}; \quad \sigma_M = \sigma_H; \quad C_{МПП(M)} = C_{МПП(H)}; \\ Y_{\Gamma(M)} &= Y_{\Gamma(H)}; \quad \rho_M = \rho_H; \quad \delta_M = \delta_H; \\ \alpha_{i(M)} &= \alpha_{i(H)}; \quad v_M = v_H \cdot k_l^{1/2}; \quad l_M = l_H \cdot k_l^{-1}, \end{aligned}$$

де k_l – масштаб лінійних розмірів l робочого органа.

Із рівностей критеріїв подібності витікають основні умови приблизного фізичного моделювання процесу взаємодії з розробленим середовищем моделі телескопічного РО одноківшевого гідравлічного екскаватора. Ці умови та допустимі межі зміни параметрів модельованого ґрунту надані в табл. 1.

Таблиця 1. Умови приблизного фізичного моделювання процесу взаємодії з розроблюваним середовищем моделі телескопічного робочого обладнання одноківшевого гідравлічного екскаватора

Table 1. Conditions of approximate physical simulation of the process of interaction with the simulated soil models of telescopic hydraulic excavator working equipment

№	Визначаючий параметр системи оригіналу	Зміна параметрів системи для моделі	
		Розрахункова формула	Допустимі межі зміни параметрів, примітки
1	2	3	4
1	Опір ґрунту зсуву	$\tau_M = \tau_H \cdot k_l^{-1}$	
2	Зчеплення ґрунту з ґрунтом	$C_{WM} = C_{WH} \cdot k_l^{-1}$	$0 \leq C_{WM} \leq 0.4 \cdot \gamma_H \cdot \frac{B_H}{k_l}$
3	Число ударів Ударника ДорНДІ	$C_{удМ} = C_{удН} \cdot k_l^{-1}$	$0 \leq C_{удМ} \leq 0.003 \cdot \gamma_H \cdot \frac{B_H}{k_l}$ (для ударника в масштабі 1:10)
4	Кут внутрішнього тертя	$\rho_M = \rho_H$	$0.92 \cdot \rho_H \leq \rho_M \leq 1.08 \cdot \rho_H$
5	Об'ємна вага	$\gamma_{Г(М)} = \gamma_{Г(Н)}$	$0.92 \cdot \gamma_{Г(Н)} \leq \gamma_{Г(М)} \leq 1.0 \cdot \gamma_{Г(Н)}$
6	Лінійні розміри	$l_M = l_H \cdot k_l^{-1}$	
7	Кути різання, загострення та ін.	$\alpha_{i(М)} = \alpha_{i(Н)}$	
8	Швидкість копання	$v_M = v_H \cdot k_l^{1/2}$	За критерієм Фруда

Задача з проведення експерименту для встановлення раціональних геометричних параметрів телескопічного РО одноківшевого гідравлічного екскаватора з врахуванням широких меж міцнісних властивостей звичайних ґрунтів може бути спрощена. Відповідно [15], за основний параметр, що визначає подібність ґрунту за міцністю, допустимо використовувати деякий умовний показник, який функціонально залежить від основних параметрів ($\tau, \rho, \delta, C_w, \gamma_2$) та відповідає цій дії на ґрунт. За такий умовний показник можна використовувати число ударів динамічного щільноміра ДорНДІ-Суд. Достатньо, щоб вказані параметри моделі не виходили за межі розбіжності, яка присутня для ґрунтів заданого типу в природному стані. Узагальнений показник $C_{уд}$ цілком задовольняє вимогам подібності та забезпечує близьку подібність в натурі та в моделі.

Дослідження процесу копання телескопічним робочим обладнанням одноківше-

вого екскаватора можливо виконати на спеціальному стенді (рис.1).

Для дослідження процесу взаємодії з розроблюваним середовищем телескопічного робочого обладнання одноківшевого гідравлічного екскаватора було розроблено стендове обладнання та фізична модель телескопічного робочого обладнання з параметричним рядом ковшів. Загальний вигляд та схема стенда представлені на рис.1,2 відповідно.

Стенд для дослідження процесу взаємодії з розроблюваним середовищем моделі телескопічного РО одноківшевого гідравлічного екскаватора містить ґрунтовий контейнер 1, виконаний у вигляді коробка зварної конструкції, в якому знаходиться модельоване середовище 2, раму 3 із закріпленим на верхній площині поворотним механізмом 4. Поворотний механізм 4 (рис. 3, б) становить нарізне з'єднання втулки з внутрішньою різью М40 5, закріпленої на рамі 3, з поворотною колонкою 6, в нижній частині якої нарізана зовнішня різь, що забез-

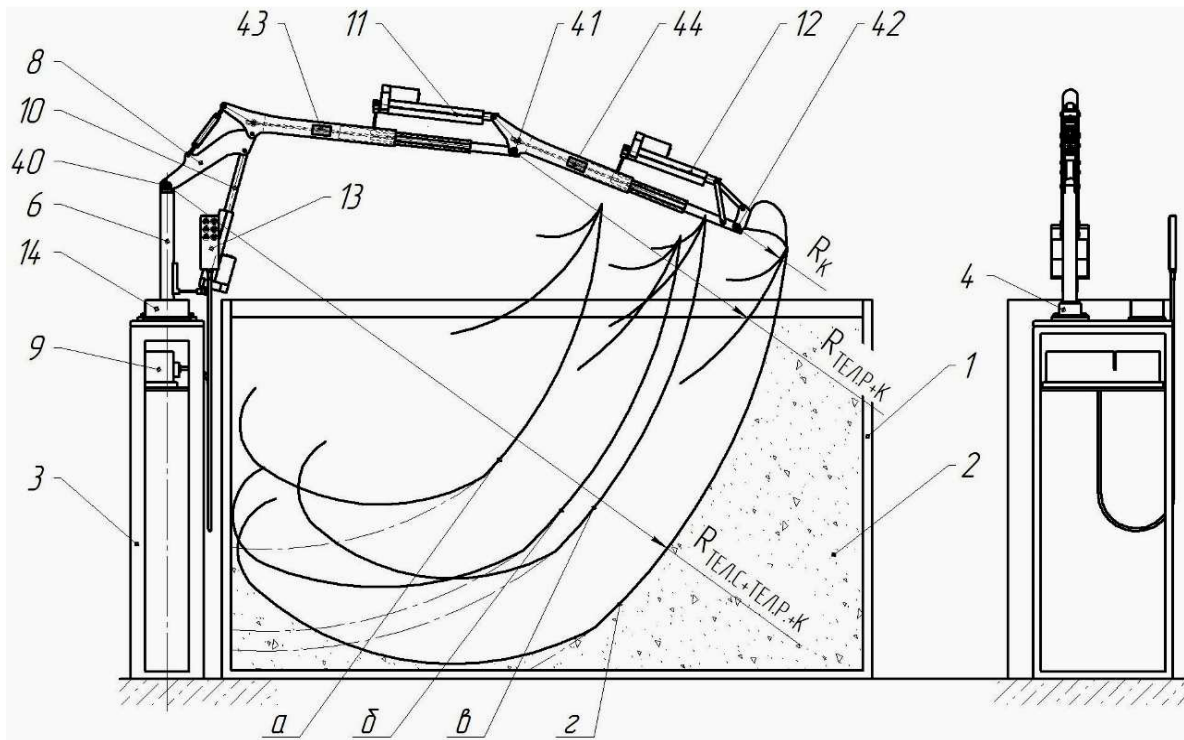


Рис.1. Загальний вигляд станда для експериментальних досліджень: R_K , $R_{ТЕЛ.Р.+К.}$, $R_{ТЕЛ.С.+ТЕЛ.Р.+К.}$ – радіуси копання ковшем, рукояттю з висунутим телескопом плюс ківш, стрілою з висунутим телескопом плюс рукоять з висунутим телескопом плюс ківш, відповідно; а) траєкторія копання при втягнутих телескопах стріли та рукояті (традиційна конструкція РО); б) те саме, при втягнутому телескопі стріли та висунутому телескопі рукояті; в) те саме, при висунутому телескопі стріли та втягнутому телескопі рукояті; г) те саме, при висунутих телескопах стріли та рукояті

Fig.1. General view of the stand for experimental investigations: R_K , $R_{ТЕЛ.Р.+К.}$, $R_{ТЕЛ.С.+ТЕЛ.Р.+К.}$ – radii of digging bucket, handle put forward from the telescope plus bucket, the boom put forward from the telescope plus handle put forward from the telescope plus bucket, respectively; а) the trajectory of the digging with pulled in telescopes of boom and handle (Traditional design WE); б) same thing, with the telescope boom pulled in and put forward telescope handle; в) same thing with put forward and pulled in boom telescope telescope handle; г) same thing with telescopes put forward boom and a handle

печує вільне обертання поворотної колонки на 360°. Фіксування поворотної колонки б у потрібному положенні забезпечується контргайкою 7. В верхній частині поворотної колонки б шарнірно закріплена модель телескопічного робочого обладнання 8.

На рамі 3 розташовано блок живлення з електронним блоком керування 9, які знаходяться в одному корпусі. До електронного блоку керування під'єднані лінійні приводи 10, 11 і 12 моделі телескопічного робочого обладнання 8, керування якими здійснюється за допомогою пульта 13. Також на рамі 3 розміщено прилад «TenzoM-8» 14 – восьмиканальний тензомостовий вимірювач/регістратор для мостових та напівмостових схем вмикання тензодатчиків. Дані з приладу через USB порт

передаються на персональний комп'ютер. Параметри приладу 14 наведені в табл. 2.

Таблиця 2. Параметри приладу TenzoM-8»

Table 2. Parameters of «TenzoM-8»

№	Параметр	Значення
1	Напруга живлення U_s , В	5
2	Шина даних	USB 2.0
3	Струм споживання I_s , мА	<200
4	Опір тензорезисторів, Ом	100...800
5	Кількість каналів	8
6	Період опитування даних, мс	13,6

Модель телескопічного робочого обладнання 8 (рис.3, а) складається з нижньої частини стріли 15, яка в нижній своїй частині

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ КОΠΑННЯ ҐРУНТУ ТЕЛЕСКОПІЧНИМ РОБОЧИМ
ОБЛАДНАННЯМ ОДНОКІВШЕВОГО ГІДРАВЛІЧНОГО ЕКСКАВАТОРА

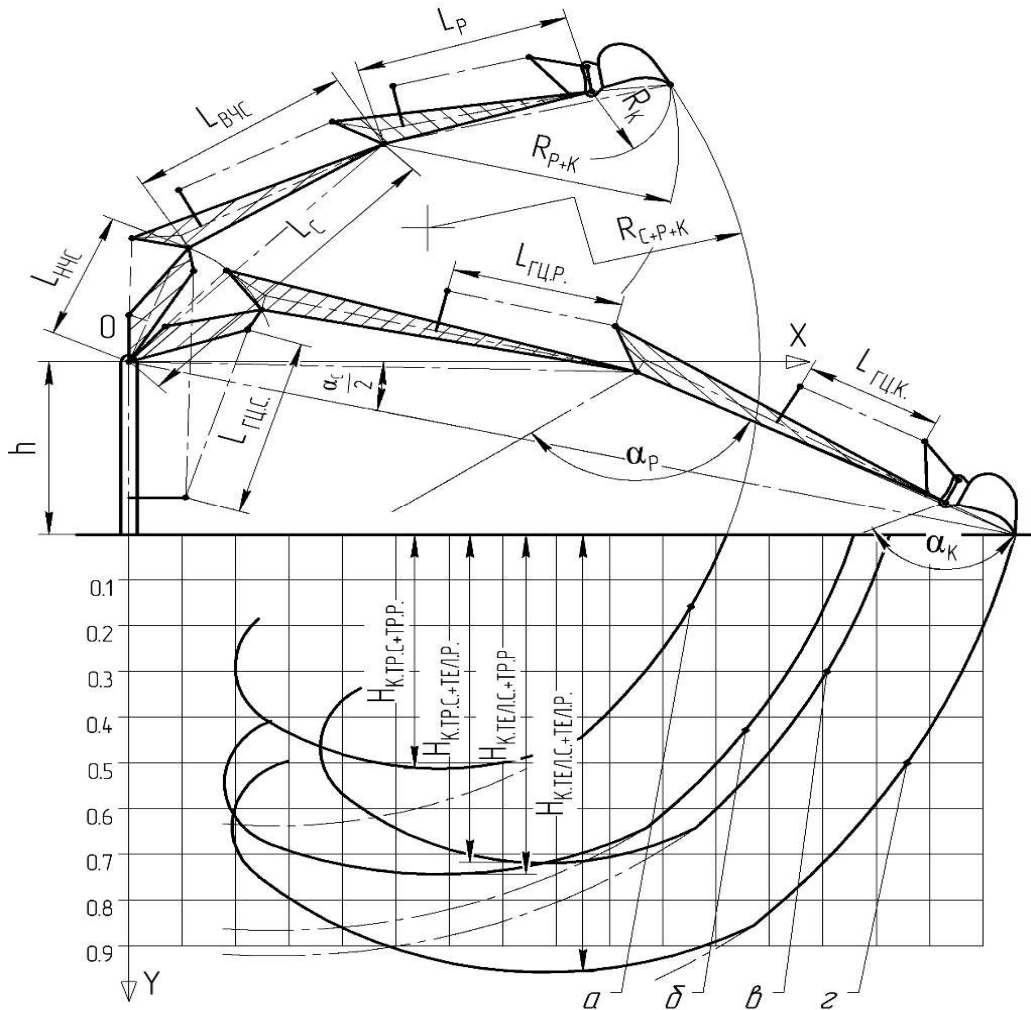


Рис. 2. Параметрична схема стану для експериментальних досліджень: $H_{К.ТР.С.+ТР.Р.}$ – максимальна глибина копання при втягнутих телескопах стріли та рукояті (традиційна конструкція РО); $H_{К.ТР.С.+ТЕЛ.Р.}$ – те саме, при втягнутому телескопі стріли та висунутому телескопі рукояті; $H_{К.ТЕЛ.С.+ТР.Р.}$ – те саме, при висунутому телескопі стріли та втягнутому телескопі рукояті; $H_{К.ТЕЛ.С.+ТЕЛ.Р.}$ – те саме, при висунутих телескопах стріли та рукояті; а) траєкторія копання при втягнутих телескопах стріли та рукояті (традиційна конструкція РО); б) те саме, при втягнутому телескопі стріли та висунутому телескопі рукояті; в) те саме, при висунутому телескопі стріли та втягнутому телескопі рукояті; з) те саме, при висунутих телескопах стріли та рукояті

Fig.2. Parametric scheme of the stand for experimental investigations: $H_{К.ТР.С.+ТР.Р.}$ – maximum digging depth with telescopes drawn into boom and a handle (Traditional design WE) ; $H_{К.ТР.С.+ТЕЛ.Р.}$ – the same thing with the telescope of boom pulled in and telescope of handle put forward; $H_{К.ТЕЛ.С.+ТР.Р.}$ – the same thing with put forward telescope of boom and pulled in telescope of handle; $H_{К.ТЕЛ.С.+ТЕЛ.Р.}$ – the same thing with telescopes put forward by boom and handle; а) the trajectory of digging with pulled in telescopes of boom and handle (Traditional design WE); б) same thing, with the telescope boom pulled in and put forward telescope handle; в) same thing with put forward and pulled in boom telescope telescope handle; з) same thing with telescopes put forward boom and a handle

шарнірно закріплена на поворотній колонці 6. На нижній частині стріли 15 розташовано осі обертання 17 та 18 верхньої частини стріли 19 та штоку лінійного приводу 10, відповідно. Також на нижній частині стріли 15 розміщено стягуючий механізм 20 зміни куту між нижньою та верхньою частинами стріли. Корпус лінійного приводу 10 шарнірно закріплений на тензометричній ланці

21, яка закріплена гвинтами на поворотній колонці 6. Верхня частина стріли 15 складається з двох бокових пластин 22 (рис. 4), на яких закріплені трисекційні телескопічні механізми 23 довжиною 360/720мм. Поміж двома телескопічними механізмами закріплено осердя 24 – прямокутну трубу перетином 10x25мм, яка забезпечує жорсткість конструкції, та тензометричну ланку 25.

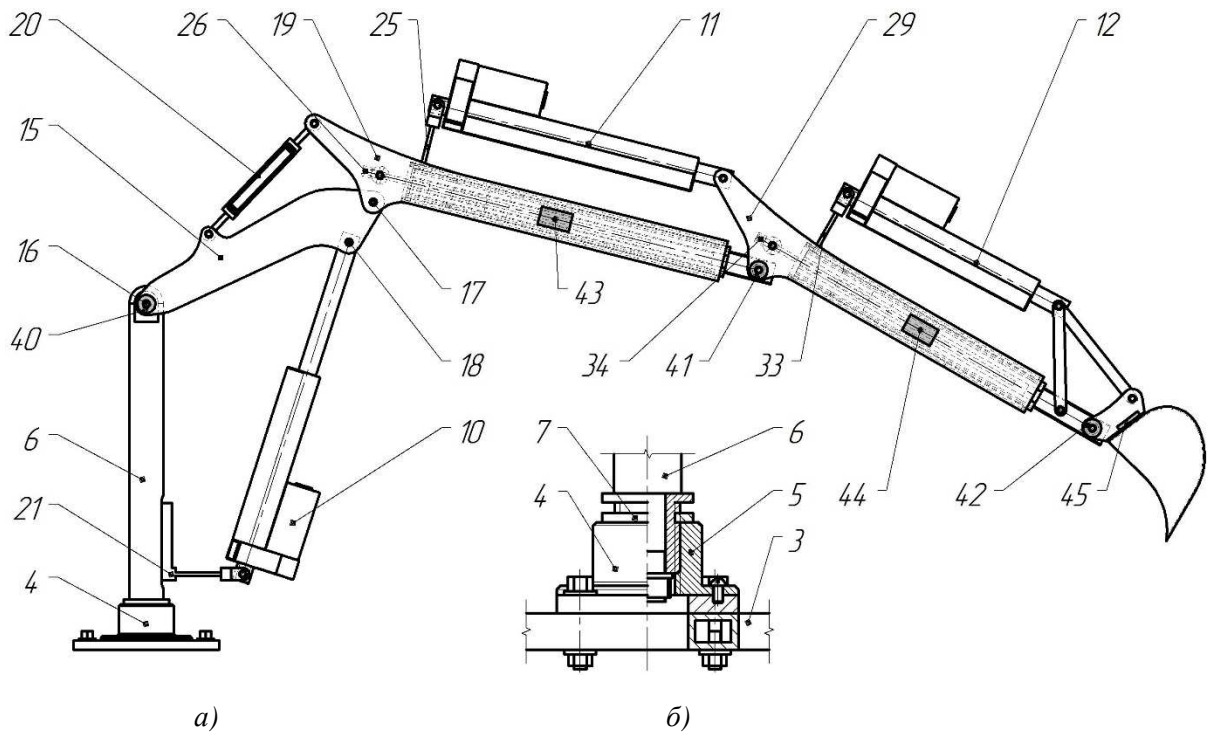


Рис.3. Фізична модель телескопічного робочого обладнання одноківшевого екскаватора: а) загальний вигляд; б) механізм обертання

Fig.3. The physical model of telescopic working equipment of hydraulic excavator: a) general view; б) mechanism of rotation

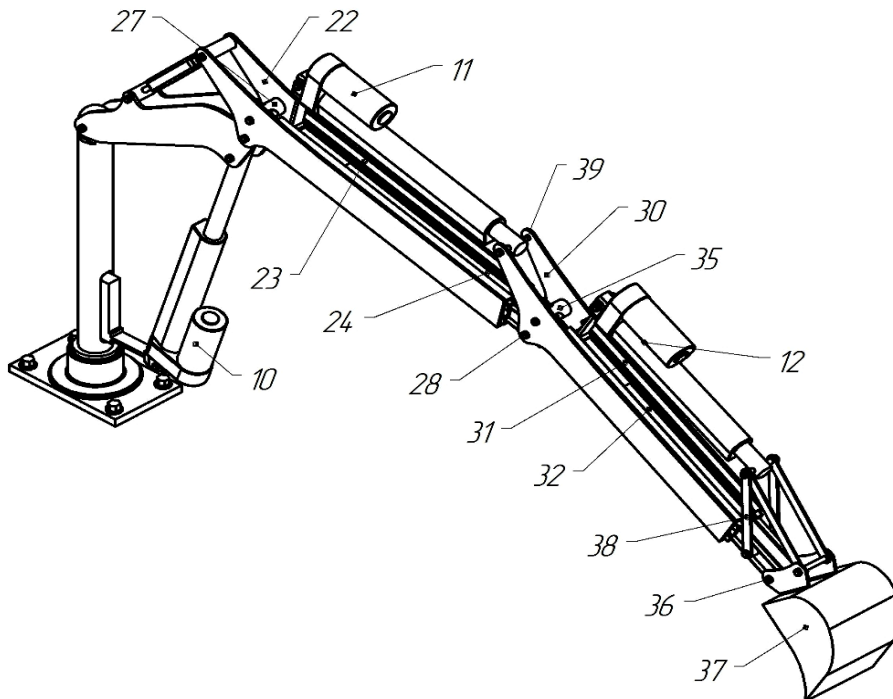


Рис.4. Фізична модель телескопічного робочого обладнання одноківшевого екскаватора в аксонометричній проекції

Fig.4. The physical model of telescopic working equipment of hydraulic excavator in axonometric projection

Тензометрична ланка 25 повторює конструкцію тензометричної ланки 21, та становить Г-подібний кронштейн, який складається з двох частин – верхньої, виконаної зі сталі 45ХНФА з накладними на неї тензорезисторами КФ5П1-10-200-А-12, та нижньої, що повторює перетин осердя 24; також нижня частина тензометричної ланки має отвір діаметром 6 мм з нарізаною різью М6. Висування-втягування телескопічного механізму 23 відбувається за рахунок обертання шпильки 26 з різью М6 в різці тензометричної ланки 25. Вільний кінець шпильки 26 заходить в осердя 24, а на другому кінці шпилька має шестигранний перетин та шарнірно закріплена в розпірці 27. На кінці осердя 24 розташований шарнір 28 кріплення рукоятки 29. Рукоятка 29 складається з двох бокових пластин 30 (рис. 4), на яких закріплені трисекційні телескопічні механізми 31 довжиною 300/600мм. Поміж двома телескопічними механізмами закріплено осердя 32 – прямокутну трубу перетином 10x25мм, яка забезпечує жорсткість конструкції, та тензометричну ланку 33. Тензометрична ланка 33 має аналогічну конструкцію тензометричним ланкам 21 і 25. Висування-втягування телескопічного механізму 31 відбувається за рахунок обертання шпильки 34 з різью М6 в різці тензометричної ланки 33. Вільний кінець шпильки 34 заходить в осердя 32, а на другому

кінці шпилька має шестигранний перетин, та шарнірно закріплена в розпірці 35. На вільному кінці осердя 32 розташований шарнір 36 кріплення ковша 37, а також вісь кріплення чотириланкового механізму 38. Обертання рукоятки здійснюється лінійним приводом 11, шток якого шарнірно закріплений на осі-розпірці 39 рукоятки, а корпус – шарнірно закріплений на тензометричній ланці 25. Обертання ковша 37 здійснюється лінійним приводом 12, шток якого шарнірно закріплений на чотириланковому механізмі 38, а корпус – шарнірно закріплений на тензометричній ланці 33. Кути повороту ковша 37 відносно осі рукоятки 29, рукоятки 29 відносно осі верхньої частини стріли 19 та нижньої частини стріли 15 відносно вертикальної осі поворотної колонки 6 реєструються датчиками змінного опору 40, 41 та 42 відповідно. Датчики підключені по напівмостовій схемі та під'єднані до приладу «TenzoM-8» 14.

Окрім датчиків 40,41 та 42 верхня частина стріли, рукоятка та ківш обладнані датчиками MPU-6050 43, 44 та 45 відповідно. Датчик MPU-6050 становить 3-х осьовий акселерометр та тривісний гіроскоп для визначення магнітних та зенітних кутів для визначення просторового позиціонування робочого обладнання та робочого органа (рис.5). Технічні характеристики датчика наведені в табл. 3.

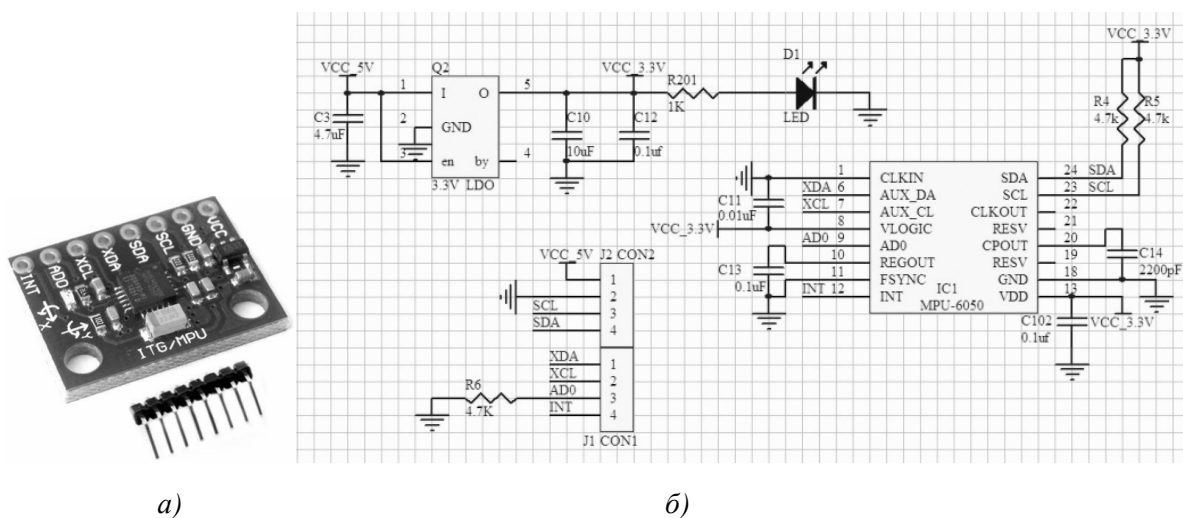


Рис. 5. Датчик MPU-6050: а) загальний вигляд; б) принципова схема

Fig.5. Sensor MPU-6050: a) general view; б) schematic diagram

Таблиця 3. Параметри датчика MPU-6050
Table 3. Sensor parameters MPU-6050

№	Параметр	Значення
1	Напруга живлення U_s , В	3-5
2	Чіп	MPU-6050
3	Діапазон гіроскопу, °/с	+250 500 1000 2000
4	Діапазон акселерометра, g	$\pm 2 \pm 4 \pm 8 \pm 16$
5	Протокол	IIC (I ² C, TWI)

Датчики 43, 44 та 45 підключаються до контролера Arduino Mega 2560 Rev3 (рис.6) технічні характеристики наведені в табл. 4.

Для всебічних осцилографічних досліджень процесу взаємодії з розроблюваним середовищем моделі телескопічного РО одноківшевого гідравлічного екскаватора було виготовлено параметричний ряд ковшів в масштабі $k_1 = 10$. Параметричний ряд складається з п'яти ковшів, параметри яких наведені в табл. 5.

При моделюванні ґрунтового середовища була використана суміш річкового піску, глини та моторного мастила в наступних співвідношеннях: 74%, 21%, 5% відповідно. Наявність в суміші моторного мастила дає змогу замінити розчинену в ній вологу, а майже його повна не випаровува-



Рис.6. Контролер Arduino Mega 2560 Rev3

Fig.6. Controller Arduino Mega 2560 Rev3

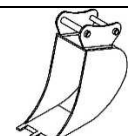
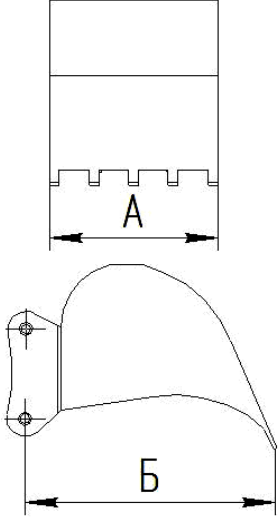

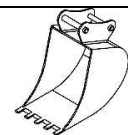
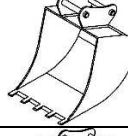
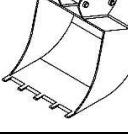
Таблиця 4. Параметри контролера Arduino Mega 2560 Rev3
Table 4. The controller parameters Arduino Mega 2560 Rev3

№	Параметр	Значення
1	Напруга живлення U_s , В	5
2	Мікроконтролер	ATmega2560 - 16AU
3	Спосіб підключення до USB	ATmega16U2-MU USB контролер
4	Кількість цифрових вводів/виводів	54
5	Кількість аналогових входів	16
6	Струм в лінії вводу I_s , мА	40
7	Флеш-пам'ять, кБ	256
8	Тактова частота, МГц	16

ність підтримує вологість повітря весь час незмінною.

Для дослідження процесу копання телескопічним робочим обладнанням одноківшевого екскаватора пропонується використовувати рототабельний центральний композиційний план другого порядку для 4-х факторів з довірчою ймовірністю 0.95, що складається з 31-ї точки N : шістнадцяти точок ядра - n_j ; восьми «зіркових» точок та семи точок в центрі плану (табл. 6). Ядро плану складається зміною факторів на двох рівнях, а «зіркові» точки будуються на осях координат, визначаючи величину «зіркового» плеча α (відстань від нульової точки до «зіркової» по осі координат) за формулою $\alpha = 2^{k/4}$ та дорівнює 2,00.

Таблиця 5. Параметри ковшів
Table 5. Parameters of buckets

№	А	Б	Місткість ковша	Вага ковша	Примітка	
	Ширина ковша	Радіус ковша				
	м	м	дм ³	кг		
1	0.060	0.150	0.44	0.530		
2	0.080	0.150	0.65	0.600		
3	0.100	0.150	0.86	0.690		
4	0.120	0.150	1.08	0.780		
5	0.140	0.150	1.3	0.850		

Таблиця 6. Матриця планування чотирифакторного рототабельного центрального композиційного плану експерименту

Table 6. Matrix of planning four factorial central composite plan of experiment

Номер досліджу	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄
1	-	-	-	-
2	+	-	-	-
3	-	+	-	-
4	+	+	-	-
5	-	-	+	-
6	+	-	+	-
7	-	+	+	-
8	+	+	+	-
9	-	-	-	+
10	+	-	-	+
11	-	+	-	+
12	+	+	-	+
13	-	-	+	+
14	+	-	+	+
15	-	+	+	+
16	+	+	+	+

взаємодії телескопічного робочого обладнання одноківшевого екскаватора з модельованим середовищем.

Фактори та рівні їхньої варіації наведені в табл. 7.

Результати експерименту по чотирифакторному рототабельному центральному композиційному плану можливо описати рівнянням регресії другого порядку

$$y_u = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i \cdot x_i + \sum_{i,j=1}^n b_{i,j} \cdot x_i \cdot x_j + \sum_{i=1}^n b_{ii}^2 \cdot x_i^2 \quad (1)$$

де b_0 – залишковий член рівняння; b_i – коефіцієнт лінійної регресії для i -го фактора; b_{ii} – коефіцієнт регресії при квадратичному члені i -го фактора; $b_{i,j}$ – коефіцієнт взаємодії i -го та j -го факторів.

Рівняння регресії (1) для чотирьох факторів приймає вигляд

$$\hat{y}_u = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_3 \cdot x_3 + b_4 \cdot x_4 + b_{12} \cdot x_1 \cdot x_2 + b_{13} \cdot x_1 \cdot x_3 + b_{14} \cdot x_1 \cdot x_4 + b_{23} \cdot x_2 \cdot x_3 + b_{24} \cdot x_2 \cdot x_4 + b_{34} \cdot x_3 \cdot x_4 + b_{11} \cdot x_1^2 + b_{22} \cdot x_2^2 + b_{33} \cdot x_3^2 + b_{44} \cdot x_4^2, \quad (2)$$

Таблиця 7. Рівні варіації факторів
Table 7. The levels of variation of factors

Фактори	Код. знач.	Рівні варіації					Інтервал варіювання
		-2	-1	0	+1	+2	
L_C – довжина стріли, м	X_1	0.432	0.504	0.576	0.648	0.720	0.72
L_P – довжина рукоятки, м	X_2	0.360	0.420	0.480	0.540	0.600	0.6
b – ширина ріжучої кромки ковша, м	X_3	0.060	0.080	0.100	0.120	0.140	0.02
$k_{\text{пит.}}$ – коефіцієнт питомого опору копання ґрунту, МПа	X_4	0.09	0.14	0.19	0.24	0.29	0.05

Для визначення коефіцієнтів регресії застосовують наступні формули:

$$b_0 = a_1 \sum_1^N y_u - a_2 \sum_1^k \sum_1^N x_{iu}^2 \cdot y_u \quad (3)$$

$$b_i = a_3 \sum_1^{n_i} x_{iu} \cdot y_u \quad (4)$$

$$b_{i,j} = a_4 \sum_1^N x_{iu} \cdot x_{ju} \cdot y_u \quad (5)$$

$$b_{ii} = a_5 \sum_1^N x_{iu}^2 \cdot y_u + a_6 \sum_1^k \sum_1^N x_{iu}^2 \cdot y_u - a_7 \sum_1^N y_u \quad (6)$$

де $a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, a_7$ – коефіцієнти, значення яких залежить від кількості факторів (k); $\sum_1^N y_u$ – сума значень виходів для всіх N варіантів матриці планування; $\sum_1^N x_{iu} \cdot y_u$ – сума добутків виходу кожного варіанта на рівні i -го фактора в цьому варіанті для всіх N варіантів плану; $\sum_1^k \sum_1^N x_{iu}^2 \cdot y_u$ – сума добутків квадрату рівнів кожного фактора в u -му варіанті на вихід y_u в цьому варіанті для всіх k факторів; $\sum_1^{n_{ij}} x_{iu} \cdot x_{ju} \cdot y_u$ – сума добутків виходів кожного варіанта на рівень i -го та j -го факторів в цьому варіанті для всіх n_{ij} варіантів; $\sum_1^N x_{iu}^2 \cdot y_u$ – сума добутків квадрату рівня кожного фактора в u -му варіанті матриці планування на вихід y_u в цьому варіанті для всіх N варіантів.

ВИСНОВКИ

Розроблено план проведення багатофакторних експериментальних досліджень для виявлення фізичної сторони процесу взаємодії моделі телескопічного робочого обладнання однокішшевого гідравлічного екскаватора з розроблюваним середовищем

(табл. 6, 7). Запропоновані рівняння регресії для чотирьох факторів (1), (2), (3), (4), (5), (6).

На основі рівнянь критеріїв подібності складені умови фізичного моделювання робочих процесів телескопічного РО однокішшевого гідравлічного екскаватора (табл.1)

Запропонована конструкція спеціального стенда для проведення всебічних експериментальних досліджень процесу копання телескопічним робочим обладнанням однокішшевого екскаватора (рис. 1-6), а також розроблена модель телескопічного РО однокішшевого екскаватора (рис.3, 4) з параметричним рядом ковшів (табл. 5).

Реалізація плану експерименту дозволить отримати пакет осцилограм прийнятого критерія оптимізації P_{01} .

ЛІТЕРАТУРА

1. *Ветров Ю.А.* Машины для земляных работ – 2-е изд., дораб. и доп. – Киев: Вища школа. Головное изд-во, 1981. – 275 с.
2. *Хмара Л.А., Кравець С.В., Нічке В.В., Назаров Л.В., Скоблюк М.П., Нікітін В.Г.* Машины для земляных работ: Навчальний посібник / Під загальною редакцією проф. Хмари Л.А. та проф. Кравця С.В. Рівне – Дніпропетровськ – Харків. – 2010. – 557 с.
3. *Хмара Л.А.* Оценка эффективности телескопического рабочего оборудования однокорового гидравлического экскаватора. Сб. научных трудов: Строительство, материаловедение, машиностроение. ПГАСиА. Днепропетровск. 2002. Вып.15. 4. 2. С. 143-150.
4. *Хмара Л.А.* Тенденции совершенствования специализированного землеройного оборудования к тракторам и экскаваторам. Сб. научных трудов: Интенсификация рабочих процессов строительных и дорожных машин. Вып. 15. Дн-ск: ПГАСиА, 2002-С. 4-27.

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ КОΠΑННЯ ҐРУНТУ ТЕЛЕСКОПІЧНИМ РОБОЧИМ
ОБЛАДНАННЯМ ОДНОКІВШЕВОГО ГІДРАВЛІЧНОГО ЕКСКАВАТОРА

5. *Хмара Л.А., Коваленко Р.В.* Исследование процесса копания грунта одноковшовым гидравлическим экскаватором с телескопическим рабочим оборудованием. Вестник приднепровской государственной академии строительства и архитектуры. Днепропетровск: Gaudeamus. 2002. №8. – С.33-40.
6. *Хмара Л.А., Колісник М.П., Станевський В.П.* Модернізація та підвищення продуктивності будівельних машин.– К.: Будівельник, 1992. – 152 с.
7. *Баловнев В.И., Хмара Л.А.* Интенсификация разработки грунтов в дорожном строительстве. – М.: Транспорт. 1993. – 383с.
8. *Беляков Ю.И., Левинзон А.Л., Галимуллин В.А.* Земляные работы, 2-е издание, переработанное и дополненное /– М.: Стройиздат, 1990, 281 с.
9. *Гаркави Н.Г.* Машины для земляных работ.– М.: Высш. шк. 1982. – 335 с.
10. *Тимошенко В.К., Хмара Л.А., Деревянчук М.И., Кулик И.А.* Методические указания к выполнению курсового проекта «Одноковшовые гидравлические экскаваторы» к дисциплине «Машины для земляных работ» для студентов механических специальностей.– Днепропетровск: ДИСИ, 1989. – 64 с.
11. *Хмара Л.А., Дахно О.О.* Телескопічне робоче обладнання гідравлічного экскаватора, оцінка його ефективності та визначення об'єму копання ґрунту. Сб. научных трудов: Строительство, материаловедение, машиностроение. ПГАСиА. Днепропетровск. 2012. Вып.66. 4. 2. С. 29-37.
12. *Хмара Л.А., Дахно О.О.* Визначення теоретичного об'єму копання ґрунту одноківшевым экскаватором з телескопічним рабочим обладнанням. Сб. научных трудов: Строительство, материаловедение, машиностроение. ПГАСиА. Днепропетровск. 2012. Вып.66. 4. 2. С. 38-49.
13. *Хмара Л.А., Дахно О.О.* Формування та оцінка ефективності телескопічного робочого обладнання одноківшевого гідравлічного экскаватора. Сб. научных трудов: Строительство, материаловедение, машиностроение. ПГАСиА. Днепропетровск. 2011. Вып.63. 4. 2. С. 142-154.
14. *Хмара Л.А., Дахно О.О., Лісничук А.Є.* Телескопічне робоче обладнання одноківшевого гідравлічного экскаватора. Сб. научных трудов: Строительство, материаловедение, машиностроение. ПГАСиА. Днепропетровск. 2011. Вып.63. 4. 2. С. 155-164.
15. *Моисеенко В.Г.* Проявление масштабного эффекта при резании грунтов. Горные, строительные и дорожные машины. Республиканский межведомственный научно-технический сборник. Выпуск №4. Киев. Техника. 1966. С. 81-86.
16. *Власов В.В.* Внешние нагрузки на рабочий орган роторного экскаватора при разработке сложноструктурного массива с наклонными слоями. Горные, строительные и дорожные машины. Республиканский межведомственный научно-технический сборник. Выпуск 25. Киев. Техника. 1978. С. 8-13.
17. *Баладинский В.Л., Баранников В.Ф.* Модель процесса динамического разрушения грунтов. Горные, строительные и дорожные машины. Республиканский межведомственный научно-технический сборник. Выпуск 27. Киев. Техника. 1979. С. 31-36.
18. *Фомін А.В., Костенюк О.О., Тетерятник О.А.* Параметри робочого процесу ґрунторуйуючих технічних систем з урахуванням розподілення потоків енергії. Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини. Всеукраїнський збірник наукових праць. Випуск №76. Київ. КНУБА. 2010. С. 66-71.
19. *Сукач М.К., Филонов Ю.П., Новиков Р.Ю.* Модель Пластической деформации грунта при щелевом резании. Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини. Всеукраїнський збірник наукових праць. Випуск №77. Київ. КНУБА. 2011. С. 3-10.
20. *Гробатюк Є.В., Комоцька С.Ю.* Методика моделювання роботи скребкового ґрунтоприбирача. Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини. Всеукраїнський збірник наукових праць. Випуск №77. Київ. КНУБА. 2011. С. 82-85.
21. *Ловейкін В.С., Міщук Д.О.* Експериментальне дослідження динаміки руху штока гідроциліндра підйому шарнірно-зчленованої стрілової системи крана маніпулятора з гідроприводом. Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини. Всеукраїнський збірник наукових праць. Випуск №78. Київ. КНУБА. 2011. С. 28-34.
22. *Хмара Л.А., Кроль Р.М.* Теоретичне дослідження бульдозера зі шнековим інтенсифікатором. Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини. Всеукраїнський збірник наукових праць. Випуск №81. Київ. КНУБА. 2013. С. 5-13.
23. *Міщук Д.О.* Огляд та аналіз конструкцій робіт для будівельних робіт. Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини. Всеукраїнський збірник наукових праць. Випуск №82. Київ. КНУБА. 2013. С. 28-37.

REFERENCES

1. *Vetrov U.A., 1981.* Mashiny dlya zemlyanyh rabot [Machinery for earthwork], Kiev, Vysha shkola, Golovnoe izd-vo Publ., 275.
2. *Khmara L.A., Kravets S.V., Nichke V.V., Nazarov L.V., Skoboluk M.P., Nikitin V.G., 2010.* Mashyny dlya zemlyanyh robot: navchalnyy posibnyk [Machinery for earthwork: Tutorial]. Rivne – Dnipropetrovsk – Kharkiv, 557
3. *Khmara L.A., 2002.* Otsenka effektivnosti teleskopicheskogo rabochego oborudovaniy odnokovsovoqo gidravlicheskoqo ekskavatora. Sb. nauchnih trudov: Stroitelstvo, materialovedenie, masinostroenie [Assessment of the effectiveness of the telescopic working equipment of hydraulic excavator]. PGASiA, Dnepropetrovsk, No.15, 143-150.
4. *Khmara L.A., Kovalenko R.V., 2002.* Issledovanie processa kopaniya grunta hidravlicheskim ekskavatorom s teleskopicheskim rabochim oborudovaniem [Investigation of the process of digging the soil hydraulic excavator shovel with telescopic working equipment]. Vestnik pridneprovskoy gosudarstvennoy akademii stroitelstva i arhitektury. Dnepropetrovsk, Gaudeamus, No.8, 33-40.
5. *Khmara L.A., 2002.* Tendentsii sovershenstvovaniya spetsializirovanogo zemleroyngo oborudovaniya k traktoram i ekskavatoram [Trends improve a specialized earthmoving equipment for tractors and excavators]. PGASiA, Dnepropetrovsk, No.15, 4-27.
6. *Khmara L.A., Kolisnyk M.P., Stanevsky V.P., 1992.* Modernizatsiya i pidvyshennja produktyvnosti budivelnyh mashin [Modernization and productivity of construction machinery]. Kyiv, Budivelnyk, 152
7. *Balovnev V.I., Khmara L.A., 1993.* Intensifikatsiya razrabotki gruntov v dorogjnom stoitelstve [Intensification of soils in the pre-construction road]. Moskva, Transport, 383.
8. *Beljakov U.I., Levinzon A.L., Galimulln V.A., 1990.* Zemljanye raboty, 2-e izdanie pererabotannoe i dopolnennoe [Earthworks, 2nd edition, revised and enlarged bonus]. Moscow, Stroyizdat, 281.
9. *Garkavi N.G., 1982.* Mashiny dlja zemljanyh rabot [Earth moving]. Moscow, Vyshaja shkola, 335.
10. *Timoshenko V.K., Khmara L.A., Derevjanchuk M.I., Kulik I.A., 1989.* Metodicheskie ukazaniya k bypolnieniu kursovogo proekta «Odnjovshovy excavator» [Methodical instructions to implement the course of the project «hydraulic excavators»]. Dnepropetrovsk, 64.
11. *Khmara L.A. Dakhno O.O., 2012.* Teleskopichne roboche obladnannja gidravlichnogo ekskavatora, otsinka yogo efektyvnosti ta vyznachennja obemu kopannja gruntu [Telescopic hydraulic excavator working equipment, evaluation of its effectiveness and determine the amount of digging soil]. PGASiA, Dnepropetrovsk, No.66, 29-37.
12. *Khmara L.A. Dakhno O.O., 2012.* Vyznachennja teoretychnogo obemu kopannja gruntu odnokivshevym ekskavatorom z teleskoichnym robochim obladnannjam [Determination of the apparent volume of soil digging excavator with telescopic working equipment]. PGASiA, Dnepropetrovsk, 38-49.
13. *Khmara L.A. Dakhno O.O., 2011.* Formuvannja ta otsinka efektyvnosti teleskopichnogo robocogo obladnannja odnokivshevogo gidravlichnogo ekskavatora [Formation and evaluating the effectiveness of the telescopic working equipment of hydraulic excavator]. PGASiA, Dnepropetrovsk, No.63, 142-154.
14. *Khmara L.A. Dakhno O.O. Lisnichuk A.E., 2011.* Teleskopichne roboche obladnannja odnokivshevogo gidravlichnogo ekskavatora [The telescopic working equipment of hydraulic excavator]. Dnepropetrovsk, No.63, 155-164.
15. *Moiseenko V.G., 1966.* Projavlenie masshtabnogo efekta pri rezanii gruntov [Manifestation of the scale effect when digging]. Gornye, stroitelnye i dorozhnye mashyny. Respublikanskiy mejvedomstvennyy nauchno-tehnicheskij sbornik. Vol.4, Kiev, 81-86.
16. *Vlasov V.V., 1978.* Vneshnye nahruzky na rabochyy orhan rotornoho ekskavatora pry razrobotke slozhnostrukturnoho massyva s naklonnyymi sloyamy [External load on the working body of rotary excavator digging hard structure array with inclined layers]. Gornye, stroytel'nye y dorozhnye mashyny. Respublykanskyy mezhvedomstvennyy nauchno-tekhnycheskyy sbornik. Vol.25, Kyiv, Tekhnika Publ., 8-13.
17. *Baladynskyy V.L., Barannykov V.F., 1979.* Model' protsessa dynamycheskoho razrushenyya hruntov [Process model of dynamic fracture soils]. Gornyye, stroytel'nye y dorozhnye mashyny. Respublykanskyy mezhvedomstvennyy nauchno-tekhnycheskyy sbornik. Vol.27, Kyiv, Tekhnika Publ., 31-36.
18. *Fomin A.V., Kostenyuk O.O., Teteryatnyk O.A., 2010.* Parametry robochoho protsesu gruntu-runyuyuchykh tekhnichnykh system z urakhu-vannyam rozpodilennya potokiv enerhiyi [Workflow settings destroying soil engineering systems based on distribution of energy flows]. Girnychi, budivelni, dorozhni ta melioratyvni

- mashini [Mining, constructional, road and melioration machines], No.76, 66-71.
19. *Sukach M.K., Fylonov Yu.P., Novykov R.Yu., 2011. Model' Plastycheskoy deformatsyy grunta pry shchelevom rezanny [The model of plastically deformation of soil with a slot cutting]. Girnychi, budivel'ni, dorozhni ta melioratyvni mashyny [Mining, constructional, road and melioration machines], No.77, 3-10.*
20. *Hrobatyuk E.V., Komots'ka S.Yu., 2011. Metodyka modelyuvannya roboty skrebkovoho gruntoprybyracha [Methods of modeling of soil scraper cleaner]. Girnychi, budivel'ni, dorozhni ta melioratyvni mashyny [Mining, constructional, road and melioration machines], No.77, 82-85.*
21. *Loveykin V.S., Mischuk D.O., 2011. Eksperymental'ne doslidzhennya dynamiky rukhu shtoka hidrotsylindra pidyomu sharnirno-zhchenovanoi strilovoyi systemy krana manipulyatora z hidropryvodom [Experimental research of the dynamics of motion of lifting cylinder rod pivotally articulated-boom of the crane arm with hydraulic]. Girnychi, budivel'ni, dorozhni ta melioratyvni mashyny [Mining, constructional, road and melioration machines], No.78, 28-34.*
22. *Khmara L.A., Krol' R.M., 2013. Teoretychne doslidzhennya bul'dozera zi shnekovym intensyfikatorom [Theoretical investigation of the bulldozer screw intensifiers]. Girnychi, budivel'ni, dorozhni ta melioratyvni mashyny [Mining, constructional, road and melioration machines], No.81, 5-13.*
23. *Mischuk D.O., 2013. Ohlyad ta analiz konstruktsey robotiv dlya budivel'nykh robit [Review and analysis of designs robots for construction]. Girnychi, budivel'ni, dorozhni ta melioratyvni mashyny [Mining, constructional, road and melioration machines], No.82, 28-37.*

