

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БУДІВНИЦТВА І АРХІТЕКТУРИ

*Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису*

ФЕДИШИН БОГДАН МИКОЛАЙОВИЧ

УДК 621.878.23-182.38

ДИСЕРТАЦІЯ

**ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ЗЕМЛЕРИЙНОГО РОБОЧОГО ОБЛАД-
НАННЯ З РУХОМИМ КОСОКУТНИМ НОЖЕМ**

133 – Галузеве машинобудування

13 – Механічна інженерія

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ Б.М. Федішин

Наукові керівники:

Рашківський Володимир Павлович
кандидат технічних наук, доцент

Пристаїло Микола Олексійович
кандидат технічних наук, доцент

Київ – 2025

АНОТАЦІЯ

Федишин Б.М. *Обґрунтування параметрів землерийного робочого обладнання з рухомим косокутним ножем.* – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертаційна робота на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 133 – «Галузеве машинобудування» – Київський національний університет будівництва і архітектури. – Київ, 2025.

Дисертаційну роботу присвячено аналізу та підвищенню ефективності використання землерийних машин та подальший розвиток наукових основ розробки ґрунтів просторово орієнтованими ножами на основі встановлення закономірностей впливу руху просторово орієнтованих ножів на ґрунт та розробки методів і моделей – обґрунтування параметрів будівельних машин для підвищення їх надійності та ефективності.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у встановленні закономірностей процесу копання ґрунтів III – V категорій відвальним робочим органом з рухомими косокутними ножами, що враховують вплив орієнтації рухомих ножів в плані по відношенню до основного руху робочого органа на енергетичні показники процесу різання ними робочого середовища .

вперше:

- обґрунтовано геометричні параметри взаємодії рухомого двогранного косокутного ножа відвалу бульдозера, які полягають в тому, що зі збільшенням кута сили різання зменшуються силові та енергетичні показники;
- розроблено математичну модель визначення силових параметрів різання ґрунтів III-V категорій, рухомими просторово орієнтованими ножами, яка враховує зниження енергоємності землерийних машин;

удосконалено:

- систему визначення характеру впливу геометричних та кінематичних параметрів просторово орієнтованих ножів на їх силові та енергетичні показники при розробці ґрунтового середовища;

набули подальшого розвитку:

- методи визначення сили копання ґрунтів III – V категорій, рухомими просторово орієнтованими ножами відвалу бульдозера;
- методи інтенсифікації землерийного робочого обладнання бульдозера

Основний зміст дисертаційної роботи.

Дисертаційну роботу спрямовано на створення моделі розрахунку та дослідженні закономірностей процесу різання рухомими просторово орієнтованими ножами відвалу бульдозера. Їх вплив на силу та енергоємність різання ґрунтів III - V категорій.

У першому розділі досліджено основні критерії оцінки різання ґрунтового середовища, де було встановлено, що вид робочого органа і його геометричні та кінематичні характеристики істотно впливають на силу різання. Також проведений аналіз праць про стружкоутворення при різанні ґрунтів, та з'ясовано, що за виглядом і типом стружки можна мати розуміння як протікає процес різання. Далі провели аналіз косокутного різання, де було встановлено характер взаємодії косокутного ножа з ґрунтовим середовищем. Наступним було проведено дослідження умов раціональності робочих органів землерийної техніки. Також досліджено джерела патентної документації та запитів в мережі інтернет, з метою визначення актуальності проблеми різання ґрунтів просторово-орієнтованими ножами при роботі землерийними машинами та подальшого аналізу запропонованих технічних рішень. В результаті вищевказаних досліджень, було встановлено, що тема косокутного різання рухомими ножами є малодослідженою, а аналіз патентів показав що тема, зберігає постійну актуальність на розглянутому часовому проміжку.

У другому розділі досліджено геологічну карту «Українського кристалічного щита», на якій виявлено найпоширеніші ґрунти на території України, а саме, мергелі, суглинки та глинисті глини.

Виведено робочу гіпотезу, руху просторово-орієнтованих ножів на відвалі бульдозера, де встановлено, що при розробці ґрунту на різних швидкостях переміщення базової машини та руху просторово орієнтованого відбувається відхилення вектору прикладання сили різання на кут (α), що в свою чергу впливає на геометричну взаємодію просторово-орієнтованого ножа з робочим середовищем. Зміна геометри-

чної взаємодії просторово орієнтованого ножа з ґрунтом впливає на силу різання, що зумовило створення параметричної моделі взаємодії просторово-орієнтованих ножів з робочим середовищем.

Модель була розроблена для різних конфігурацій ножів відвалу бульдозера і різних співвідношень швидкості бульдозера до швидкості руху просторово орієнтованого ножа.

Була створена розрахункова модель, відповідно до робочої гіпотези, де було отримано п'ять планів руху просторово орієнтованих ножів відвального обладнання, у кореляції до відхилення прикладеної повної сили різання на кут α . Проведено розрахунок сил різання ґрунту на різних глибинах при роботі рухомих просторово орієнтованих ножів робочого органу.

У третьому розділі описано програму та об'єкт проведення експериментальних досліджень. Експериментальні дослідження проводилися з метою перевірки адекватності отриманих аналітичних даних. У експериментальному дослідженні, для дотримання умов подібності процесів, що відбуваються, при взаємодії фізичної моделі оригінального робочого органу, з навколишнім середовищем, необхідно дотримуватися рівності, критеріїв геометричної та динамічної подібності. Виражено параметри натурного процесу через параметри фізичної моделі та коефіцієнти подібності.

Для проведення експериментальних досліджень процесу різання робочого середовища просторово орієнтованими відвалами ножового обладнання було вдосконалено динамометричний стенд для реєстрації силового навантаження авторської конструкції КНУБА, що дозволило провести повноцінні експериментальні дослідження з урахуванням усіх існуючих факторів взаємодії робочого середовища та робочого органу під час різання. Запропоновано використання ґрунтів III, IV та V категорій як робочого середовища.

За допомогою CAD систем, було створено 3D модель та випробувального стенду, для реєстрації сил різання, з рухомих просторово орієнтованих ножем, при цьому симулювати різні види роботи, навантажень та частоти власних коливань.

Вирішити відомі недоліки випробувального стенду та удосконалити його конструкцію. Відповідно до побудованої 3D моделі, відтворити справжню модель пристрою поздовжньо-поступального переміщення, та самого рухомого просторово орієнтованого ножа.

Підібрано та модернізовано вимірювально-реєструюче обладнання, та створено методику проведення експериментальних досліджень.

Проведені експериментальні дослідження в повній мірі підтверджують адекватність теоретичних розрахунків, а порівняння теоретичних та експериментальних результатів визначення сили різання показало їх достатню збіжність і, відповідно, правомірність використання аналітичних виразів при розрахунку силових параметрів машин з просторово орієнтованими ножами відвального обладнання.

Максимальне значення похибки визначення сили різання теоретичним та експериментальним шляхом на лабораторному стенді реєстрації сил різання просторово орієнтованими ножами відвального обладнання становить $\Delta_{\delta}=10,06\%$.

У четвертому розділі досліджено загальний опір та його складові, що виникають під час роботи бульдозера в ґрунтовому середовищі та процесів у призмі волочіння.

Цей загальний опір є сукупністю кількох окремих сил: опору необхідного для розрізання робочого середовища; опору від волочіння призми ґрунту перед відвалом; опору, що виникає при русі ґрунту вгору по поверхні відвалу; опору руху самого бульдозера; а також тертя відвалу об ґрунт.

Результатом дослідження являється демонстрація того, що використання рухомих просторово орієнтованих ножів на відвалі значно зменшує необхідну силу різання. Розрахунки та графіки підтверджують, що чим більше змінюється кут α прикладання сили різання, тим легше зрізається ґрунт. Це зменшення опору різанню безпосередньо позитивно впливає на стійкість машини під час роботи, що є важливим фактором в умовах експлуатації.

Також було досліджено ключові показники ефективності роботи землерийної машини, а саме продуктивності, що вимірюється в обсягах переміщеного ґрунту за одиницю часу, та енергоємності, кількості енергії, необхідної для виконання одини-

ці роботи. У важких ґрунтах високий опір змушує бульдозер зрізати тонші шари, що знижує об'єм ґрунту, який може бути переміщений за один цикл, і збільшує загальну тривалість робочого циклу. Однак, завдяки зменшенню сили різання, досягнутому за допомогою рухомих просторово орієнтованих ножів, бульдозер може розвивати вищу робочу швидкість. Це призводить до значного збільшення загальної продуктивності машини і до зниження питомої витрати енергії на одиницю виконаного обсягу роботи. Оптимізація цих двох показників є основним завданням для максимізації вигоди та зниження експлуатаційних витрат у будівельній та гірничодобувній галузях.

Ключові слова: бульдозер, відвал, ножі відвалу, просторово-орієнтовані, ко-сокутне різання, просторово орієнтований, стружкоутворення, просторово-орієнтований, відвал екскаватора, вектор, співвідношення швидкостей, параметризація, сила різання, просторова орієнтація, кут повороту в плані, опір різанню, комп'ютерне випробування, бульдозерний відвал, випробувальний стенд, парафін, установка, фізична модель, різання, робочий орган, середовище, моделювання, коефіцієнти подібності, лабораторний стенд, експериментальне дослідження, стенд, вимірювально-реєструюче обладнання, ймовірність виконання нерівності, 3D проектування, навантаження на грані, оптимізація, енергоємність, переміщення..

ABSTRACT

Fedyshyn B.M. Substantiation of parameters for earthmoving working equipment with a movable oblique-angled blade. – *Qualification Research as the manuscript.*

Dissertation for obtaining the scientific degree of Doctor of Philosophy in specialty 133 – “Industrial Mechanical Engineering” – Kyiv National University of Construction and Architecture. – Kyiv, 2025.

The dissertation is devoted to the analysis and improvement of the efficiency of the use of earthmoving machines and the further development of the scientific foundations of soil development with spatially oriented knives based on the establishment of the regularities of the influence of the movement of spatially oriented knives on the soil and the development of methods and models – justification of the parameters of construction machines to increase their reliability and efficiency.

The scientific novelty of the obtained results lies in the determination of the regularities of the process of digging soils of categories III - V by a blade working body with movable oblique knives, which take into account the influence of the orientation of the movable knives in the plan in relation to the main movement of the working body on the energy indicators of the process of cutting the working medium by them.

first developed:

- The geometric parameters for the interaction of the movable two-sided oblique knife of the bulldozer blade were substantiated, demonstrating that an increase in the cutting force angle reduces the required force and energy indicators;

- a mathematical model for determining the power parameters of cutting soils of categories III - V by movable spatially oriented knives was developed, which takes into account the reduction of the energy intensity of earthmoving machines;

improved:

- a system for determining the nature of the influence of the geometric and kinematic parameters of spatially oriented knives on their power and energy indicators when developing the soil medium;

acquired further development:

- methods for determining the digging force of soils of categories III–V by moving spatially oriented blades of a bulldozer blade;
- methods for intensification of the earthmoving working equipment of a bulldozer

The main content of the dissertation work.

The dissertation work is aimed at creating a calculation model and studying the regularities of the cutting process by moving spatially oriented blades of a bulldozer blade. Their influence on the force and energy intensity of cutting soils of categories III – V.

In the first chapter, examines the main criteria for assessing the cutting of the soil environment, where it was established that the type of working body and its geometric and kinematic characteristics significantly affect the cutting force. An analysis of works on chip formation during cutting of soils was also conducted, and it was found that by the type and type of chips one can have an understanding of how the cutting process proceeds. Then, an analysis of oblique cutting was conducted, where the nature of the interaction of the oblique knife with the soil environment was established. Next, a study of the conditions of rationality of the working bodies of earthmoving equipment was conducted. Sources of patent documentation and Internet queries were also studied in order to determine the relevance of the problem of cutting soils with spatially oriented knives when working with earthmoving machines and further analysis of the proposed technical solutions. As a result of the above studies, it was found that the topic of oblique cutting with movable knives is poorly studied, and the analysis of patents showed that the topic remains constantly relevant in the considered time period.

In the second chapter, a geological map of the “Ukrainian Crystalline Shield” was studied, on which the most common soils on the territory of Ukraine were identified, namely, marls, loams and clayey clays.

A working hypothesis of the movement of spatially oriented knives on a bulldozer blade was derived, where it was established that when developing the soil at different speeds of movement of the base machine and the movement of the spatially oriented one, the vector of the application of the cutting force by an angle (α) is deviated, which in turn affects the geometric interaction of the spatially oriented knife with the working environment. A change in the geometric interaction of the spatially oriented knife with the soil

affects the cutting force, which led to the creation of a parametric model of the interaction of spatially oriented knives with the working environment.

The model was developed for different knife configurations and different ratios of the speed of the bulldozer to the speed of movement of the spatially oriented knife.

A computational model was created, in accordance with the working hypothesis, where five plans of movement of the spatially oriented knives of the blade equipment were obtained, in correlation with the deviation of the applied total cutting force by an angle α . The calculation of soil cutting forces at different depths during the operation of movable spatially oriented knives of the working body is carried out.

In the third chapter describes the program and object of experimental research. Experimental research was carried out to verify the adequacy of the obtained analytical data. In the experimental study, in order to comply with the conditions of similarity of the processes occurring during the interaction of the physical model of the original working body with the environment, it is necessary to adhere to the equality, criteria of geometric and dynamic similarity. The parameters of the natural process are expressed through the parameters of the physical model and similarity coefficients.

To conduct experimental studies of the process of cutting the working environment with spatially oriented blades of knife equipment, a dynamometer stands for registering the force load of the author's design of KNUBA was improved, which allowed conducting full-fledged experimental studies taking into account all existing factors of interaction of the working environment and the working body during cutting. It was proposed to use soils of categories III, IV and V as a working environment.

Using CAD systems, a 3D model of the test stand was created for registering cutting forces with a moving spatially oriented knife, while simulating various types of work, loads and frequencies of natural oscillations.

To solve the known shortcomings of the test stand and improve its design. According to the constructed 3D model, to recreate a real model of the longitudinal translational movement device and the moving spatially oriented knife itself.

The measuring and recording equipment were selected and modernized, and the methodology for conducting experimental studies was developed.

The conducted experimental studies fully confirm the adequacy of theoretical calculations, and the comparison of theoretical and experimental results of determining the cutting force showed their sufficient convergence and, accordingly, the validity of using analytical expressions when calculating the force parameters of machines with spatially oriented knives of blade equipment.

The maximum error value of determining the cutting force by theoretical and experimental means on the laboratory stand for recording cutting forces by spatially oriented knives of blade equipment is $\Delta_\delta=10.06\%$.

In the fourth chapter presents an investigation into the total resistance and its constituent components that are generated during the operation of a bulldozer within a soil medium, specifically focusing on the dynamics of the soil drag prism.

This total resistance is defined as the summation of several distinct forces: the resistance necessary for the cutting of the working medium; the resistance arising from the dragging of the soil prism preceding the blade; the resistance developed during the upward movement of soil along the surface of the blade; the resistance to the motion of the bulldozer itself; and the frictional force between the blade and the soil.

The core finding of this research is the demonstration that the implementation of movable spatially-oriented knives on the blade significantly reduces the requisite cutting force. Empirical calculations and graphical analyses confirm a correlational relationship: a greater change in the cutting force application angle α results in a corresponding reduction in the force required to shear the soil. This minimization of cutting resistance directly and positively influences the operational stability of the machine, which constitutes a critical parameter in field exploitation conditions.

Furthermore, the study examined key performance metrics for earthmoving machinery, namely productivity (quantified as the volume of displaced soil per unit of time) and energy intensity (the energy expenditure required to perform a unit of work). In heavy soils, elevated resistance compels the bulldozer to engage with thinner layers, thereby decreasing the volume of soil transportable per cycle and augmenting the overall duration of the work cycle. Conversely, the reduction in cutting force achieved via the movable spatially-oriented knives enables the bulldozer to attain a higher working velocity. This

mechanism facilitates a substantial increase in the machine's overall productivity and a concomitant reduction in the specific energy consumption per unit of completed work volume. The optimization of these two indicators is paramount for maximizing economic benefit and mitigating operating costs across the construction and mining sectors.

Keywords: bulldozer, blade, blade knives, spatially oriented, oblique cutting, spatially oriented, chip formation, spatially oriented, excavator blade, vector, speed ratio, parameterization, cutting force, spatial orientation, angle of rotation in the plan, cutting resistance, computer testing, bulldozer blade, test stand, paraffin, installation, physical model, cutting, working body, environment, modelling, similarity coefficients, laboratory stand, experimental research, stand, measuring and recording equipment, probability of inequality fulfilment, 3D designing, load on faces, optimization, energy intensity, movement.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ НАУКОВИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

*Статті у наукових періодичних виданнях інших держав та у виданнях України, які
включено до міжнародних наукометричних баз:*

1. Рашківський В., Федішин Б. (2020). Аналіз засобів різання ґрунтів просторово-орієнтованими ножами динамічної дії землерийних машин. Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини. Вип. 96. С. 28–34. <https://doi.org/10.32347/gbdmm2020.96.0401>. [Index Copernicus] ISSN(print): 2312-6590, ISSN(online): 2709-6149 URL: <http://gbdmm.knuba.edu.ua/article/view/232468/231207>
2. Рашківський В., Федішин Б. (2021). Аналіз характеру стружкоутворення при роботі просторово-орієнтованими ножами динамічної дії. Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини. Вип. 97. С. 57–61. <https://doi.org/10.32347/gbdmm97.0402>. [Index Copernicus] ISSN(print): 2312-6590, ISSN(online): 2709-6149 URL: <http://gbdmm.knuba.edu.ua/article/view/251968/249350>
3. Rashkivskiy V., Fedyshyn B. (2023). Development of the information model of the soil cutting process spatially oriented knife of dynamic action. Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини, (102), 24–30. <https://doi.org/10.32347/gbdmm.2023.102.0301> [Категорія «Б»] ISSN(print): 2312-6590, ISSN(online): 2709-6149 URL: <http://gbdmm.knuba.edu.ua/article/view/294737/287582>
4. Rashkivskiy V., Fedyshyn B. (2023). Modelling of soil destruction process by bulldozer using a spatially oriented working unit. Transfer of innovative technologies, 6(1), 58–70. <https://doi.org/10.32347/tit.2023.61.0202> [Категорія «Б»] ISSN: 2617-0264(print), ISSN: 2664-2697(online) URL: <http://tit.knuba.edu.ua/article/view/295565/288492>

5. Rashkivskiy V. P., Prystailo M. O., Fedyshyn B. M., Besida A. S. (2025). Development of a physical model and determination of similarity coefficients of a spatially oriented knife of a bulldozer blade. *Visnyk of Kherson National Technical University*, 1, No. 1(92), 198–203. <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.1.1.25> [Категорія «Б»] ISSN: 2078-4481 (Print) URL: https://journals.kntu.kherson.ua/index.php/visnyk_kntu/article/view/886/851
6. Rashkivskiy V., Prystailo M., Fedyshyn B. (2025). Results of experimental studies of cutting soils with spatially oriented knives of blade equipment. *Girnychi, budivelni, dorozhni ta melioratyvni mashyny*, (105), 62–72. <https://doi.org/10.32347/gbdmm.2025.105.0401> [Категорія «Б»] ISSN(print): 2312-6590, ISSN(online): 2709-6149 URL: <http://gbdmm.knuba.edu.ua/article/view/330197/319696>
7. Rashkivskiy V., Prystailo M., Fedyshyn B., Balaka M.(2025). Methods of conducting a bench-scale experimental study with a spatially oriented knife of a bulldozer blade. *International Science Journal of Engineering & Agriculture*,4(1), 79–92. <https://doi.org/10.46299/j.isjea.20250401.07>. [Index Copernicus] eISSN 2720-6319, URL: <https://isg-journal.com/isjea/article/view/941/515>

Статті у періодичних наукових виданнях, проіндексованих у базах даних Web of Science Core Collection та/або Scopus:

1. Rashkivskiy V., Fedyshyn B. (2023). Development of a parametric model of the spatially oriented knife on the bulldozer blade. *Strength of Materials and Theory of Structures*. Issue 111. P. 263–275. <https://doi.org/10.32347/2410-2547.2023.111.263-275> [Web of Science Core Collection] ISSN 2410-2547 URL: <http://omtc.knuba.edu.ua/article/view/296740/289738>
2. Maksymiuk Yu. V., Rashkivskiy V. P., Prystailo M. O., Fedyshyn B. M. (2024). Development and computer testing of equipment for cutting soils with spatially oriented knives of a bulldozer blade. *Strength of Materials and Theory of Structures*. Issue 113. P. 285–296. <https://doi.org/10.32347/2410-2547.2024.113.285-296>

Тези доповідей наукових та науково-практичних конференцій:

1. Рашківський В., Федішин Б. (2021). Дослідження процесу руйнування ґрунтів просторово орієнтованими ножами динамічної дії. Сучасні проблеми та перспективи розвитку машинобудування України: матеріали Міжнар. наук.-практ. онлайн конф., 23-24 верес. 2021 р. Київ: НУБІП. С. 219-221. URL: https://nubip.edu.ua/sites/default/files/u232/zbirnik_tez.pdf
2. Рашківський В., Федішин Б. Дослідження деформацій просторово орієнтованого ножа динамічної дії при роботі землерийної техніки. Build-Master-Class-2022: Proceedings of the International scientific-practical conference of young scientists, November 30 – December 02, 2022. Kyiv: KNUCA, 2022. P. 247–248. URL: <https://drive.google.com/file/d/1M7G7eFmtYo-rlxPTsTltRxq9rhPhemwB/view>.
3. Рашківський В., Федішин Б. Зменшення енергоємності процесу різання ґрунтів землерийною технікою з просторово орієнтованим робочим органом. Енергоощадні машини і технології: тези III Міжнар. наук.-практ. конф., 17-19 трав. 2022 р. Київ: КНУБА. С. 98. URL: http://library.knuba.edu.ua/books/zbirniki/27/ESMT_Conference_Proceedings_2022_PDF.pdf
4. Федішин Б. М. Інформаційна модель розрахунку взаємодії просторово орієнтованого ножа з робочим середовищем. Енергоощадні машини і технології: матеріали IV Міжнар. наук.-практ. конф., 23–25 трав. 2023 р. К.: КНУБА, 2023. С. 65–68. URL: http://esmt.knuba.edu.ua/wp-content/uploads/2023/07/ESMT_2023_Conference_proceedings_Le_finale.pdf.
5. Федішин Б. Створення та аналіз моделі просторово орієнтованого ножа землерийної техніки за допомогою CAD програм. Build-Master-Class-2024: Proceedings of the International Scientific-Practical Conference of Young Scientists

- (November 5–7, 2024). Kyiv: KNUCA, 2024. 321–322. URL: <https://bmc.knuba.edu.ua/archive/>.
6. Fedyshyn B. Simulation of a spatial moving knife of a dump working body. Проблеми та перспективи розвитку технічних та біоенергетичних систем природокористування: конструювання та дизайн: тези доп. XXIV Всеукр. конф. наук.-пед. працівників, наук. співробітників та аспірантів (10–11 квіт. 2025 р.). К.: НУБіП України, 2025. С. 95–96. URL: https://nubip.edu.ua/sites/default/files/u232/zbirnik_3.pdf.
7. Федишин Б., Балака М. Верифікація переміщення просторово орієнтованого ножа на випробувальному стенді. Енергоощадні машини і технології: матеріали VI Міжнар. наук.-практ. конф. (20–21 трав. 2025 р.). К.: КНУБА, 2025. С. 57–60. URL: http://esmt.knuba.edu.ua/wp-content/uploads/2025/07/ESMT-2025_Збірник-тез.pdf.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	18
РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ТА АНАЛІЗ ОСОБЛИВОСТЕЙ РОБОТИ ВІДВАЛЬНОГО ОБЛАДНАННЯ ТА НОЖІВ ЗЕМЛЕРИЙНОЇ ТЕХНІКИ	28
1.1. Основні критерії оцінки різання ґрунтового середовища.....	28
1.2. Умови раціональності робочих органів землерийних машин	33
1.3. Огляд та аналіз досліджень в області застосування відвального обладнання землерийних машин з просторово орієнтованими ножами	36
1.4. Аналіз розроблених технічних рішень проведенням патентного пошуку та пошукових запитів	42
1.5. Постановка задачі.....	52
Висновки по розділу 1	53
РОЗДІЛ 2. СИЛОВИЙ ТА ЯКІСНИЙ АНАЛІЗ РОБОТИ ВІДВАЛУ ЗЕМЛЕРИЙНОЇ ТЕХНІКИ З РУХОМИМИ ПРОСТОРОВО ОРІЄНТОВАНИМИ НОЖАМИ	55
2.1 Загальні положення. Особливості роботи просторово орієнтованих рухомих ножів	55
2.2. Побудова робочої гіпотези, просторово орієнтованих рухомих ножів відвального обладнання.....	61
2.3. Параметризація просторово орієнтованих рухомих ножів відвального обладнання	64
2.4. Силовий аналіз при роботі рухомих просторово орієнтованих ножів	74
2.5. Результати розрахунку сили різання просторово орієнтованими рухомих ножів відвального обладнання.....	84
Висновки по розділу 2	88

РОЗДІЛ 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ СИЛ РІЗАННЯ ГРУНТОВОГО СЕРЕДОВИЩА РУХОМИМИ ПРОСТОРОВО ОРІЄНТОВАНИМИ НОЖАМИ	90
3.1 Програма та об'єкт експериментальних досліджень.....	91
3.2. Визначення коефіцієнтів подібності.	92
3.3. Опис та створення експериментальної установки.....	95
3.4. Вимірювально-реєстраційне обладнання.	107
3.5. Методика планування експериментальних досліджень, обробки та узагальнення даних.	114
3.6. Проведення експериментального дослідження та порівняння експериментальних та теоретичних даних	117
Висновки по розділу 3	127
РОЗДІЛ 4. ПРОДУКТИВНІСТЬ ТА ЕНЕРГОЄМНІСТЬ РОЗРОБКИ ҐРУНТІВ ПРИ ВИКОРИСТАННІ РУХОМИХ ПРОСТОРОВО ОРІЄНТОВАНИХ НОЖІВ ВІДВАЛУ ЗЕМЛЕРИЙНИХ МАШИН.....	130
4.1 Визначення сили різання ґрунту відвалом при роботі землерийних машин з рухомими просторово орієнтованими ножами	131
4.2. Продуктивність та енергоємність землерийних машин з просторово орієнтованими ножами	136
Висновки по розділу 4	145
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	146
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	149
ДОДАТКИ.....	162

ВСТУП

Актуальність теми. Науково-технічний прогрес в будівництві здійснюється на основі впровадження у виробництво принципово нової техніки і матеріалів, прогресивної технології, випуску машин і агрегатів великої одиничної потужності і продуктивності.

Підвищення продуктивності праці в будівельному, дорожньому і комунальному машинобудуванні може бути забезпечене тільки за рахунок використання техніки яка потребує створення високопродуктивних машин для комплексної механізації основних робіт й підвищення потужностей машин при одночасному зменшенні їхніх габаритів та металоємності.

Вирішення проблеми криється в установленні закономірностей процесу розробки ґрунтового масиву землерийним робочим обладнанням з косокутним рухо-мим ножом, що дає змогу зменшити енерговитрати та інтенсифікувати процес різання та вилучення ґрунтового масиву.

Аналіз досліджень, присвячених косокутному різанню, копанню й переміщенню ґрунтів, свідчить про більшу ефективність цих процесів у порівнянні із прямокутним, хоча окремі результати експериментальних досліджень є спірними й суперечливими. Деякі аспекти взаємодії косокутних робочих органів із ґрунтом вивчені недостатньо повно. До їхнього числа необхідно віднести насамперед питання про можливість зниження енергоємності процесу за рахунок застосування принципів косокутного різання в різальних частинах робочих органів землерийних машин.

Такий підхід обумовлює актуальність теми, що і є основною задачею даного дисертаційного дослідження.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Наукова робота відповідає напрямку, проєкту «Стратегією розвитку промисловості» над яким активно працює Міністерство економіки України, де машинобудування також визначено як ключовий напрямок. Ця стратегія, має бути фіналізована до кінця 2025 року і розрахована на період 2026-2030 років.

Дисертація відповідає паспорту спеціальності 133 – Галузеве машинобудування.

Дисертаційне дослідження було виконано на кафедрі будівельних машин факультету автоматизації і інформаційних технологій Київського національного університету будівництва і архітектури, та пов'язане з науковим дослідженням в рамках комплексної теми «Дослідження, обґрунтування та розробка комплексів машин для будівельних, дорожніх та лісотехнічних робіт» (номер державної реєстрації 0119U000195).

Результати дослідження впроваджено в навчальний процес в межах Київського національного університету будівництва і архітектури.

Зокрема, в навчальні програми дисциплін:

- «Вступ до фаху» для бакалаврів спеціальності «Галузеве машинобудування» кафедри будівельних машин.

- «Вступ до фаху» для бакалаврів спеціальності «Прикладна механіка», спеціалізації «Інженерія логістичних систем» кафедри машин та обладнання технологічних процесів.

- «Будівельні машини та обладнання» для бакалаврів спеціальності «Будівництво та цивільна інженерія», спеціалізації «Промислове та цивільне будівництво» кафедр будівельної механіки, металевих та дерев'яних конструкцій, залізобетонних та кам'яних конструкцій, геотехніки, будівельних технологій, організації та управління будівництвом, економіки будівництва;

- «Будівельні машини та обладнання» для бакалаврів спеціальності «Будівництво та цивільна інженерія», спеціалізації «Міське будівництво та господарство» кафедри міського будівництва.

- «Будівельні машини та обладнання» для бакалаврів спеціальності «Будівництво та цивільна інженерія», спеціалізації «Технологія будівельних конструкцій, виробів і матеріалів», кафедри технології будівельних конструкцій і виробів;

- «Будівельні машини та обладнання» для бакалаврів спеціальності «Професійна освіта», спеціалізації «Професійна освіта. Будівництво та зварювання», кафедри професійної освіти.

Дисертація містить наукові положення, нові науково обґрунтовані теоретичні результати проведених досліджень, які мають істотне значення для галузі знань 13 – Механічна інженерія

Мета дисертаційного дослідження являється подальший розвиток наукових основ розробки ґрунтів просторово орієнтованими ножами динамічної дії на основі встановлення закономірностей впливу динамічного руху просторово орієнтованих ножів на ґрунт та розробки методів і моделей – обґрунтування параметрів будівельних машин для підвищення їх надійності та ефективності.

Для досягнення означеної мети в роботі сформульовані наступні задачі:

- здійснити аналіз сучасного стану моделей та теорій процесів руйнування, існуючих конструкцій та методів розрахунку, рухомих просторово орієнтованих ножів відвалу бульдозера;
- обґрунтувати фізико-математичну модель процесу руйнування ґрунтів, рухомих просторово орієнтованим ножом, та виконати аналітичні дослідження цього процесу;
- встановити закономірності руйнування ґрунтів, з урахуванням взаємодії із рухомих просторово орієнтованим ножом, та виконати аналітичні дослідження цього процесу;
- дослідити та виявити фактори, які впливають на характер робочих процесів, для визначення раціональних геометричних параметрів рухомого просторово орієнтованого ножа;
- розробити методику та програму проведення лабораторних досліджень, на спеціальному динамометричному стенді;
- звести та порівняти, теоретичні та експериментальні результати дослідження;
- дослідити вплив зміни конструктивних параметрів, рухомого просторово орієнтованого ножа, на енергоємність процесу руйнування ґрунтового масиву

Методи дослідження. Теоретичні дослідження виконані на основі математичного моделювання різальних процесів взаємодії просторово орієнтованих ножів динамічної дії та ґрунтового масиву.. При цьому використано математичний апарат

диференціального та інтегрального обчислення. Для теоретичних розрахунків використано прикладні комп'ютерні програми “AutoCAD 2024”, “Inventor 2024”, “SolidWorks 2018”, “Excel 2016” і “MathCad 2000”.

Для обґрунтування та проведення експериментальних досліджень були використані методи математичного моделювання та статистики. Для статичної обробки результатів експериментальних досліджень використано пакет “Excel 2016”. Збір експериментальних даних проведено за допомогою програми “Tenzo Cut”, створеної з використанням компілятора “Borland Turbo Pascal V7.1”.

Експериментальні дослідження проводились в лабораторних умовах на тензометричному стенді авторської конструкції КНУБА із застосуванням запроектованого обладнання.

Достовірність результатів проведеного дослідження, висновків та рекомендацій, що викладені в дисертації забезпечується обґрунтованим застосуванням загальних положень класичної теорії механічних систем і суцільних середовищ, достатнім для механічних систем збігом теоретичних і експериментальних досліджень (розбіжність не перевищує 10%).

Об’єкт дослідження – різальні процеси, взаємодії рухомих просторово орієнтованих ножів та ґрунтового масиву.

Предмет дослідження – закономірності зміни енергетичних, силових, конструктивних параметрів процесу різання ґрунту просторово орієнтованими ножами.

Теоретичне та практичне значення одержаних результатів.

Дисертаційну роботу присвячено вирішенню важливої проблеми різанню ґрунтів рухомих просторово орієнтованих робочим органом.

Теоретична та практична цінність дисертації полягає у створенні моделі розрахунку та підбору, рухомих просторово орієнтованих ножів відвалу землерийної техніки для різних категорій ґрунтів.

Запропонована робота полягає у створенні будівельної техніки з просторово орієнтованими робочими органами, для збільшення її продуктивності та зменшення енергоємності процесів розробки ґрунтових середовищ. А також уніфікації будівельного автопарку, за допомогою створення багатозадачних робочих органів.

Результати роботи знайшли відображення в навчальному процесі КНУБА для підготовки фахівців зі спеціальностей «Галузеве машинобудування», «Прикладна механіка» та «Професійна освіта. Машинобудування», а також при виконанні курсового та дипломного проектування.

Основний зміст дисертаційної роботи

Дисертаційну роботу спрямовано на створення моделі розрахунку та дослідженні закономірностей процесу різання рухомими просторово орієнтованими ножами відвалу бульдозера. Їх вплив на силу та енергоємність різання ґрунтів III - V категорій.

У першому розділі досліджено основні критерії оцінки різання ґрунтового середовища, де було встановлено, що вид робочого органа і його геометричні та кінематичні характеристики істотно впливають на силу різання. Також проведений аналіз праць про стружкоутворення при різанні ґрунтів, та з'ясовано, що за виглядом і типом стружки можна мати розуміння як протікає процес різання. Далі провели аналіз косокутного різання, де було встановлено характер взаємодії косокутного ножа з ґрунтовим середовищем. Наступним було проведено дослідження умов раціональності робочих органів землерийної техніки. Також досліджено джерела патентної документації та запитів в мережі інтернет, з метою визначення актуальності проблеми різання ґрунтів просторово-орієнтованими ножами при роботі землерийними машинами та подальшого аналізу запропонованих технічних рішень. В результаті вищевказаних досліджень, було встановлено, що тема косокутного різання рухомими ножами є малодослідженою, а аналіз патентів показав що тема, зберігає постійну актуальність на розглянутому часовому проміжку.

У другому розділі досліджено геологічну карту «Українського кристалічного щита», на якій виявлено найпоширеніші ґрунти на території України, а саме, мергелі, суглинки та глинисті глини.

Виведено робочу гіпотезу, руху просторово-орієнтованих ножів на відвалі бульдозера, де встановлено, що при розробці ґрунту на різних швидкостях переміщення базової машини та руху просторово орієнтованого відбувається відхилення вектору прикладання сили різання на кут (α), що в свою чергу впливає на геометричну

взаємодію просторово-орієнтованого ножа з робочим середовищем. Зміна геометричної взаємодії просторово орієнтованого ножа з ґрунтом впливає на силу різання, що зумовило створення параметричної моделі взаємодії просторово-орієнтованих ножів з робочим середовищем.

Модель була розроблена для різних конфігурацій ножів і різних співвідношень швидкості бульдозера до швидкості руху просторово орієнтованого ножа.

Була створена розрахункова модель, відповідно до робочої гіпотези, де було отримано п'ять планів руху просторово орієнтованих ножів відвального обладнання, у кореляції до відхилення прикладеної повної сили різання на кут α . Проведено розрахунок сил різання ґрунту на різних глибинах при роботі рухомих просторово орієнтованих ножів робочого органу.

У третьому розділі описано програму та об'єкт проведення експериментальних досліджень. Експериментальні дослідження проводилися з метою перевірки адекватності отриманих аналітичних даних. У експериментальному дослідженні, для дотримання умов подібності процесів, що відбуваються, при взаємодії фізичної моделі оригінального робочого органу, з навколишнім середовищем, необхідно дотримуватися рівності, критеріїв геометричної та динамічної подібності. Виражено параметри натурного процесу через параметри фізичної моделі та коефіцієнти подібності.

Для проведення експериментальних досліджень процесу різання робочого середовища просторово орієнтованими відвалами ножового обладнання було вдосконалено динамометричний стенд для реєстрації силового навантаження авторської конструкції КНУБА, що дозволило провести повноцінні експериментальні дослідження з урахуванням усіх існуючих факторів взаємодії робочого середовища та робочого органу під час різання. Запропоновано використання ґрунтів III, IV та V категорій як робочого середовища.

За допомогою CAD систем, було створено 3D модель та випробувального стенду, для реєстрації сил різання, з рухомим просторово орієнтованим ножом, при цьому симулювати різні види роботи, навантажень та частоти власних коливань.

Вирішити відомі недоліки випробувального стенду та удосконалити його конструкцію. Відповідно до побудованої 3D моделі, відтворити справжню модель пристрою поздовжньо-поступального переміщення, та самого рухомого просторово орієнтованого ножа.

Підібрано та модернізовано вимірювально-реєструюче обладнання, та створено методику проведення експериментальних досліджень.

Проведені експериментальні дослідження в повній мірі підтверджують адекватність теоретичних розрахунків, а порівняння теоретичних та експериментальних результатів визначення сили різання показало їх достатню збіжність і, відповідно, правомірність використання аналітичних виразів при розрахунку силових параметрів машин з просторово орієнтованими ножами відвального обладнання.

Максимальне значення похибки визначення сили різання теоретичним та експериментальним шляхом на лабораторному стенді реєстрації сил різання просторово орієнтованими ножами відвального обладнання становить $\Delta_{\delta}=10,06\%$.

У четвертому розділі досліджено загальний опір та його складові, що виникають під час роботи бульдозера в ґрунтовому середовищі та процесів у призмі волочіння.

Цей загальний опір є сукупністю кількох окремих сил: опору необхідного для розрізання робочого середовища; опору від волочіння призми ґрунту перед відвалом; опору, що виникає при русі ґрунту вгору по поверхні відвалу; опору руху самого бульдозера; а також тертя відвалу об ґрунт.

Результатом дослідження являється демонстрація того, що використання рухомих просторово орієнтованих ножів на відвалі значно зменшує необхідну силу різання. Розрахунки та графіки підтверджують, що чим більше змінюється кут α прикладання сили різання, тим легше зрізається ґрунт. Це зменшення опору різанню безпосередньо позитивно впливає на стійкість машини під час роботи, що є важливим фактором в умовах експлуатації.

Також було досліджено ключові показники ефективності роботи землерийної машини, а саме продуктивності, що вимірюється в обсягах переміщеного ґрунту за одиницю часу, та енергоємності, кількості енергії, необхідної для виконання одини-

ці роботи. У важких ґрунтах високий опір змушує бульдозер зрізати тонші шари, що знижує об'єм ґрунту, який може бути переміщений за один цикл, і збільшує загальну тривалість робочого циклу. Однак, завдяки зменшенню сили різання, досягнутому за допомогою рухомих просторово орієнтованих ножів, бульдозер може розвивати вищу робочу швидкість. Це призводить до значного збільшення загальної продуктивності машини і до зниження питомої витрати енергії на одиницю виконаного обсягу роботи. Оптимізація цих двох показників є основним завданням для максимізації вигоди та зниження експлуатаційних витрат у будівельній та гірничодобувній галузях.

Ключові слова: бульдозер, відвал, ножі відвалу, просторово-орієнтовані, ко-сокутне різання, просторово орієнтований, стружкоутворення, просторово-орієнтований, відвал екскаватора, вектор, співвідношення швидкостей, параметризація, сила різання, просторова орієнтація, кут повороту в плані, опір різанню, комп'ютерне випробування, бульдозерний відвал, випробувальний стенд, парафін, установка, фізична модель, різання, робочий орган, середовище, моделювання, коефіцієнти подібності, лабораторний стенд, експериментальне дослідження, стенд, вимірювально-реєструюче обладнання, ймовірність виконання нерівності, 3D проектування, навантаження на грані, оптимізація, енергоємність, переміщення.

Особистий внесок здобувача.

Основні результати теоретичних і експериментальних досліджень дисертаційної роботи, наведені в дисертації, отримані автором самостійно. У спільних опублікованих наукових роботах авторів належить: дослідження існуючих патентних документів з метою визначення актуальності проблеми різання ґрунтів просторово-орієнтованими ножами при роботі землерийних машин [40]; дослідження перспективи використання просторово орієнтованих ножів для розробки ґрунтів [38]; розробка гіпотези роботи просторово орієнтованого ножа відвалу бульдозера [39]; оптимізація конструкції просторово орієнтованого ножа у відповідності до робочої гіпотези [88]; аналіз енергоємності процесу різання ґрунтів, в залежності від геометричних параметрів просторово орієнтованих ножів відвального обладнання [51];

створення інформаційної моделі напрямку результуючої сили різання ґрунту просторово орієнтованими ножами [52]; побудова планів переміщення та створення моделі розрахунку зусиль різання ґрунту просторово орієнтованими ножами [66]; дослідження впливу зміни вектору результуючої сили різання на геометричну взаємодію просторово орієнтованого ножа з ґрунтом. Створення параметричної модель взаємодії просторово-орієнтованих ножів з робочим середовищем [55]; встановлення закономірностей взаємодії просторово орієнтованого ножа з робочим середовищем [68]; створення 3D моделі експериментальної установки для різання ґрунту просторово-орієнтованими робочими органами землерийних машин. Проведення її комп'ютерного випробування у CAD середовищі моделювання навантажень. Визначені міцнісних та частотних характеристик [82]; створення 3D моделі приводу з просторово орієнтованим ножем. Проведення деформаційних тестувань, для подальшого натурного відтворення приводу [83]; побудова фізичної моделі та визначення коефіцієнтів подібності просторово орієнтованого ножа землерийної техніки [75]; проведення експериментального дослідження та проведення порівняння з теоретичними дослідженнями та математичною моделлю [107]; удосконалення конструкції приводу та просторово орієнтованого ножа її оптимізації при розрахункових навантаженнях [87]; створення методики проведення експериментального дослідження просторово орієнтованим ножем. Удосконалення конструкції динамометричного випробувального стенду [99]; верифікація переміщення просторово орієнтованого ножа на експериментальному стенді у відповідності до робочої гіпотези [104].

Апробація роботи. Результати дисертаційної роботи доповідались і обговорювалися на конференціях:

XXIV Всеукраїнська конференція науково-педагогічних працівників, наукових співробітників та аспірантів " Проблеми та перспективи розвитку технічних та біоенергетичних систем природокористування: конструювання та дизайн " (2025 р., м. Київ.: НУБіП);

VI Міжнародна науково-практична конференція "Енергоощадні машини і технології" (2025 р., м. Київ.: КНУБА).

Дисертаційна робота, в цілому, була заслухана та розглянута на розширеному засіданні кафедр будівельних машин, машин і обладнання технологічних процесів та основ професійного навчання КНУБА (27 травня 2025 р.)

Публікації. Результати дисертаційної роботи опубліковані у 16 наукових працях, з яких 6 статей у наукових фахових виданнях України, 1 стаття у науковому виданні іншої держави; 2 статті у періодичних наукових виданнях, проіндексованих у базах даних Web of Science Core Collection та/або Scopus; 7 тез наукових доповідей та науково-практичних конференцій.

Структура і обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків і додатків. Повний обсяг дисертаційної роботи складає 179 сторінок: обсяг основного тексту 131 сторінки, містить 97 рисунків, 27 таблиць, 7 додатки і список використаних джерел зі 125 найменувань.

РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ТА АНАЛІЗ ОСОБЛИВОСТЕЙ РОБОТИ ВІДВАЛЬНОГО ОБЛАДНАННЯ ТА НОЖІВ ЗЕМЛЕРИЙНОЇ ТЕХНІКИ

У розділі досліджено основні критерії оцінки різання ґрунтового середовища, де було встановлено, що вид робочого органа і його геометричні та кінематичні характеристики істотно впливають на силу різання. Також проведений аналіз праць про стружкоутворення при різанні ґрунтів, та з'ясовано, що за виглядом і типом стружки можна мати розуміння як протікає процес різання. Далі провели аналіз косокутного різання, де було встановлено характер взаємодії косокутного ножа з ґрунтовим середовищем. Наступним було проведено дослідження умов раціональності робочих органів землерийної техніки. Також досліджено джерела патентної документації та запитів в мережі інтернет, з метою визначення актуальності проблеми різання ґрунтів просторово-орієнтованими ножами при роботі землерийними машинами та подальшого аналізу запропонованих технічних рішень. В результаті вищевказаних досліджень, було встановлено, що тема косокутного різання рухомими ножами є малодослідженою, а аналіз патентів показав що тема, зберігає постійну актуальність на розглянутому часовому проміжку.

1.1. Основні критерії оцінки різання ґрунтового середовища

Копання, різання ґрунтів є однією з найбільш енергоємних операцій землерийних машин. Великий вплив на енергоємність копання роблять кінематичні умови та конструкція робочого органа. Тому, особливо актуальним являється питання, визначення енергоємності копання та кінематики руху, робочого органа з просторово орієнтованим ножом. Одним з показників яке сигналізує як протікає процес різання ґрунту є стружкоутворення.

Основним способом механічної розробки ґрунтів являється, різання з відокремленням стружки. При цьому способі розробки ґрунтів також є різновиди в залежності від геометричних умов.

Основними геометричними умовами відокремлення ґрунтової стружки, визначаються різновидами способів механічної розробки ґрунтів, пропонується вважати

положення кромки ріжучого клина відносно напрямку різання і поверхні масиву, обриси ріжучої кромки, обриси і кількість робочих поверхонь ріжучого клина, число поверхнею так званого бокового зрізу і так званих блокованих поверхонь зрізу. По цим признакам виділені різновиди процесу і створена класифікація видів різання з відокремленням стружки [1, 2, 3].

При роботі землерийної машини її виконавчий механізм взаємодіє із ґрунтом, руйнуючи й відокремлюючи його від масиву. Основними характеристиками процесу копання є геометричні, кінематичні, силові й енергетичні параметри а також показники, що визначають фізичні особливості руйнування ґрунту, і властивості ґрунту як об'єкта взаємодії, конструкції робочого органа й умов взаємодії робочого органа з ґрунтом.

Робочий орган землерийної техніки долає комплекс опорів ґрунту, який називається опором різанню. Сила, що прикладається до робочого органу для подолання цього опору по дотичній траєкторії руху, називається силою різання, а по нормалі до траєкторії – нормальною силою різання. Установлено що сила різання становить істотну частину сили копання, а в ряді випадків – переважну частину.

Сила різання, в той же час є найбільш змінною її частиною в часі. Це внаслідок коливальної природи процесу різання. Коливання сили відбувається в результаті періодичності відділення елементів зрізу, варіації міцнісних властивостей ґрунтів, непостійності геометричних і кінематичних параметрів процесу, а також інших факторів [4, 5].

Особливість процесу різання полягає в тому, що його силові й енергетичні показники залежать від кінематичних умов, та від геометричних параметрів – товщини, ширини і площі зрізу, а також від кутів орієнтації робочого органа в просторі.

Признак класифікації:

- По положенню ріжучої кромки інструмента відносно напрямку різання;
- По обрисам робочої поверхні ріжучого клина;
- По обрисам ріжучої кромки;
- По числу робочих поверхонь ріжучого клина;
- По положенню ріжучої кромки відносно поверхні масиву;

- По числу поверхонь зрізу;
- По числу блокованих поверхонь зрізу.

Вид різання з відокремленням стружки:

Прямокутне, косокутне;

- Плоским клином, криволінійним клином;
- Клином з прямолінійною, криволінійною або ломаною ріжучою кромкою;
- Клином з однією, двома або декількома робочими поверхнями;
- Паралельно поверхні масиву, під прямим кутом, під косим кутом до неї;
- З однією, двома або трьома поверхнями зрізу;
- Блоковане, вільне, напівблоковане.

Характер і особливості утворення стружки як засіб для пояснення процесу і пошуку способу керування ним. Однією з ознак процесу різання ґрунтів являється тип стружкоутворення. Стружка поділяється на чотири типи:

- Зливна;
- Ступінчаста;
- Елементна;
- Відривна.

Зливна стружка відрізняється формою цілісної стрічки, гладкою зі сторони різця і шорсткою, але майже без нерівностей на зовнішній стороні.

Ступінчаста стружка це як видозмінена елементна. Відрізняється лише тим, що послідовні елементи які вилучаються з масиву з'єднуються знову. Така стружка має гладку поверхню зі сторони різця і ступінчасту зовні.

Елементна стружка складається з окремих кусочків а форма має закономірність.

Відривна стружка утворюється у вигляді незв'язних між собою кусків матеріалу неправильної форми [6, 7, 8].

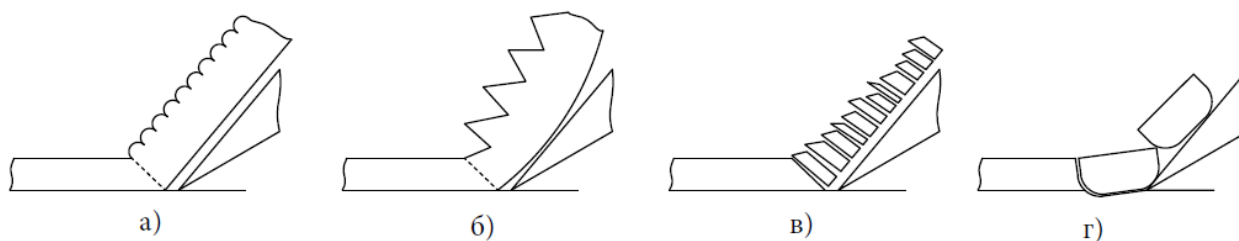


Рисунок 1.1. Види стружки при різанні ґрунтів: а) зливна; б) ступінчаста; в) елементна; г) відривна

Також досліджувались експериментальні дані різання ґрунтів косокутного різання професора В.М. Смірнова [9, 10]. Де було проведено ряд експериментів з використанням ножів косокутного різання а саме: планувальний ніж шириною 25см; гострі ножі шириною 3,5,7 й 10 см. з кутом різання 30,50,70 й 90 градусів і з кутом повороту в плані 0° ; $22^\circ 30'$; 45° й $67^\circ 30'$. Всі дослідницькі ножі мали однакову різальну кромку й задній кут різання 10° .

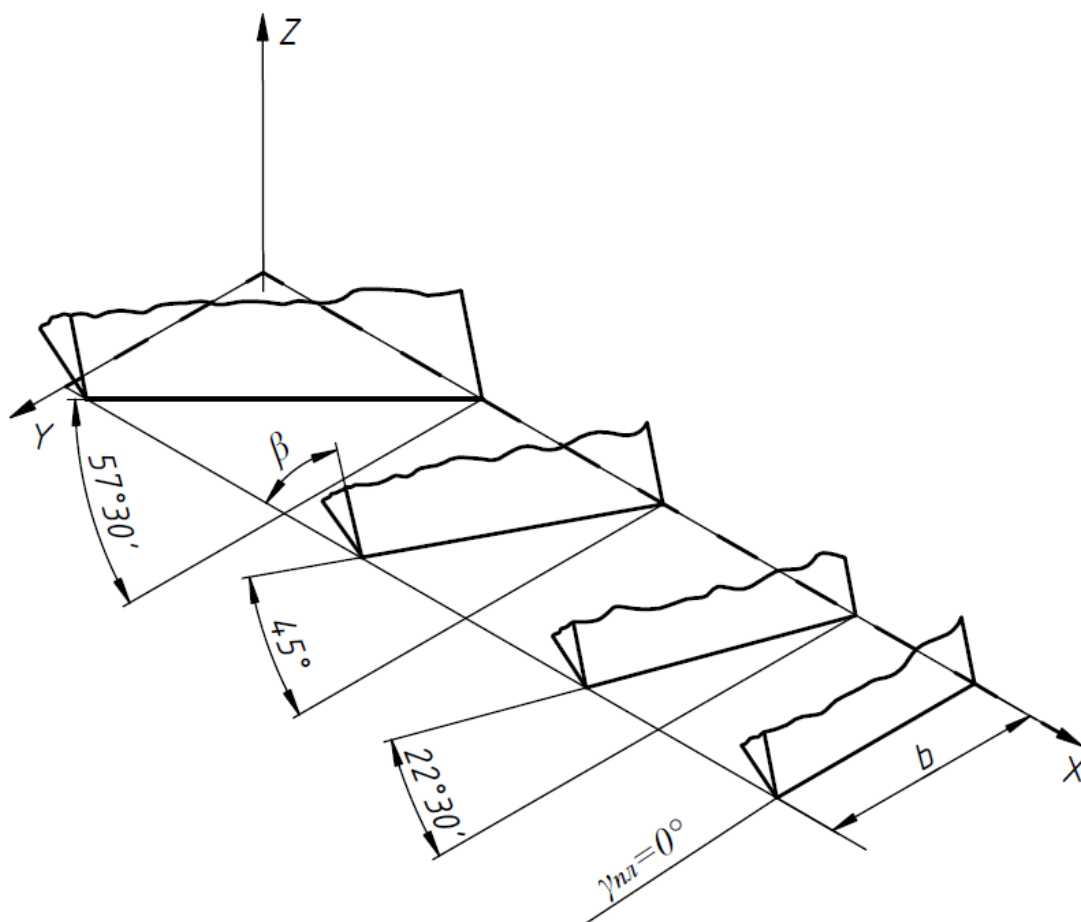


Рисунок 1.2. Косокутні ножі з різними кутами повороту в плані

Руйнування ґрунтів і середовищ при різанні ножами супроводжується формуванням стружки, відокремлюваної від масиву. Стружка є свого роду відбивачем внутрішніх змін у матеріалі. Тому характер й особливості утворення стружки здобувають значення як засіб для пояснення процесу й відшукування способу керування ним. Одним з ознак процесу різання ґрунтів є тип стружкоутворення.

Характер стружкоутворення в ґрунті може змінюватися залежно від геометричних умов процесу різання.

Відомо, що при прямокутному блокованому різанні ґрунтів зі зміною глибини (товщини) зрізу спостерігається зміна видів стружкоутворень у того ж самого ґрунту. При тонких зрізах утворюється зливна стружка, але після збільшення товщини зрізу починає відокремлюватися стружка ступінчаста й елементна. При деякій глибині зрізу руйнування супроводжується утворенням одного великого елемента у лобовій поверхні ножа, тобто ширина зрізу й ширина елемента стають рівними. Пояснення полягає в тім, що процес різання із пластичним деформуванням ґрунту в межах всієї товщини зрізу переходить у процес різання із пластичним деформуванням тільки частини ґрунту відокремлюваного елемента. Це явище знайшло підтвердження в серії дослідів по різанню досліджуваних ґрунтів ножами з кутом повороту в плані 0° ; $22^\circ 30'$; 45° й $67^\circ 30'$.

Досліди показали, що при різних кутах різання ґрунтова стружка формується по-різному. При куті різання 30° між наступними відділеннями від масиву двох великих елементів стружки (характерною рисою їх є пересічення поверхні відділення з горизонтальною поверхнею масиву) відокремлюються також дрібні елементи стружки. Число проміжних елементів стружки в 3-5 разів більше числа великих елементів, у той час як маси їх перебувають у співвідношенні 1:7-1:10. Збільшення кута різання до 50° супроводжується зменшенням числа проміжних елементів стружки й ростом їхньої маси. При куті різання 70° поверхні відділення всіх елементів стружки перетинаються з горизонтальною поверхнею масиву, а при куті різання 90° маса елементів, що відокремлюються, практично постійна або утворюється зливна стружка [11, 12, 13, 14].

Таким чином, з ростом кута різання зменшується об'єм ґрунту, що відокремлюється від масиву, зростають у ньому пластичні деформації, виникають витрати енергії на деформування масиву під різальною кромкою ножа, енергоємність різання збільшується.

Неодночасність відділення елементів стружки виникає у випадках, коли ширина ножа (при незмінній ширині зрізу) у багато разів перевищує товщину зрізу. У тих випадках, коли ширина ножа порівнянна з товщиною зрізу або менше товщини зрізу, це явище не виникає.

Внаслідок неодноразовості відділення елементів стружки по ширині зрізу збільшується коефіцієнт енергоємності. Відбувається це тому, що максимумами сил різання зменшуються, а мінімумами їх зростають. Через більше здрібнювання ґрунту збільшується також енергоємність процесу різання.

Було знайдено закономірності при зміні кутів різання й повороту ножа в плані, що доцільно надавати різальному інструменту землерийних машин кута різання не більше $35-40^\circ$ і кута повороту в плані не більше $30-45^\circ$ для найбільш продуктивного різання ґрунту.

1.2. Умови раціональності робочих органів землерийних машин

При роботі землерийної машини її виконавчий механізм взаємодіє із ґрунтом, руйнуючи й відокремлюючи його від масиву. Основними характеристиками процесу різання є геометричні, кінематичні, силові й енергетичні параметри, а також показники, що визначають фізичні особливості руйнування ґрунту. Характеристики процесу різання є функцією трьох аргументів: властивостей ґрунту як об'єкта взаємодії, конструкції робочого органа й умов взаємодії робочого органа із ґрунтом.

Робочий орган землерийної машини при русі долає комплекс опорів ґрунту, який називається опором різанню. Сила, що прикладається до робочого органу для подолання цього опору по дотичній до траєкторії руху, називається силою конання, а по нормалі до траєкторії - нормальною силою копання. Установлено, що сила різання становить істотну частину сили копання, а в ряді випадків - переважну части-

ну [15, 16, 17].

Сила різання, будучи істотною частиною сили копання є в той же час найбільш змінною її частиною в часі. Це наслідок коливальної природи процесу різання. Коливання сили різання відбуваються в результаті періодичності відділення елементів зрізу, варіації міцнісних властивостей ґрунтів, непостійності геометричних і кінематичних параметрів процесу, а також інших факторів.

Таким чином, основна особливість процесу копання ґрунтів землерийними машинами полягає в тому, що сила різання є істотною й найбільш мінливою за величиною частиною сумарного навантаження на робочий орган [124].

Друга особливість процесу копання полягає в тому, що його силові й енергетичні показники залежать від геометричних параметрів - товщини, ширини й площі зрізу, а також від кутів орієнтації робочого органа в просторі.

У процесі роботи землерийної машини в силу ряду причин геометричні параметри копання можуть сильно відхилятися від розрахункових у бік збільшення. Тому робочий орган може сприймати які завгодно більші зовнішні навантаження, значно перевищуючі розрахункові. Через недотримання нормальних геометричних параметрів процесу або в результаті зустрічі робочого органа із ґрунтом високої міцності зовнішні навантаження можуть досягти стопорного значення, при якому виконавчий механізм зупиняється. Це є третьою особливістю робочого процесу землерийних машин [18].

Крім того, силові й енергетичні показники процесу копання істотно залежать від його кінематичних умов.

Ще одна особливість копання ґрунтів полягає в залежності його характеристик від конструкції робочого органа - елемента виконавчого механізму землерийної машини, безпосередньо взаємодіючим з розроблювальним ґрунтом [19, 125].

Конструкція робочого органа залежить від технологічного призначення машини, що може полягати у відділенні ґрунту від масиву, захвату, нагромадженні й утриманні ґрунту при транспортуванні, плануванні, переміщенні по поверхні масиву, нарізуванні щілин або інших порожнин тощо.

По конструкції робочі органи землерийних машин діляться на різальні, ков-

шові, відвальні та інші. Обов'язковим складовим елементом робочих органів є різальна частина у вигляді одного або декількох зубів, ножів або їхніх комбінацій. Незважаючи на різноманіття конструкцій робочих органів землерийних машин, всі вони призначені для розробки ґрунтів способом різання [20, 21].

Дослідження процесу різання ґрунтів і розробки корисних копалин, вивчення робочого процесу землерийних машин і проектування показують, що при достатній міцності, надійності й технологічності робочих органів основними умовами раціональності їхніх конструкцій слід вважати можливо малу енергоємність різання розроблювального матеріалу, обмеження розмірів відокремлюваних від масиву кусків, забезпечення рівномірності робочого режиму машини, достатнє заповнення ковшових робочих органів при можливо швидкому й повному їхньому розвантаженні. Ці умови повинні забезпечуватися при узгодженні закономірностей різання ґрунту й руху робочих органів.

Умова можливо меншої енергоємності різання, як визначною для конструкцій робочого органа, може бути викопана на підставі дотримання закономірностей цього процесу. Дослідженнями [22, 23, 24, 25] встановлено, що опори порід різанню неоднакові в різних точках зони руйнування перед ножом. Під час прямокутного блокованого різання, коли матеріал руйнується в межах прорізу трапецієподібного перетину, питомий опір ґрунту в бокових розширеннях прорізу звичайно у два-три рази менше, ніж у її середній частині. Тому для зменшення енергоємності процесу, різальної частині робочих органів землерийних машин варто надавати форму й розміри, при яких можливо більша частина матеріалу буде руйнуватися, як у бокових розширеннях прорізі при простому блокованому різанні, і можливо мала - як перед лобовою гранню ножа. Для цього зусилля варто зосередити на різальних елементах (ножа, зубів) деякої оптимальної ширини при даній глибині різання.

До способів зниження енергоємності різання ґрунту відносяться також: виключення козирка з роботи різання; ортогональність різальних кромek траєкторіям; оптимальність кутів різання; не перевищення припустимого затуплення і зносу зубів.

Обмеження розмірів відокремлюваних кусків можна досягти розчленуванням і

почерговим відпрацьовуванням частин перетину зрізу; установкою розпушувальних зубів між ковшами в роторних екскаваторах; установкою додаткових зубів на козирку робочих органів екскаваторів.

Рівномірність робочого режиму землерийної машини можна досягти за рахунок зменшення коливань сил різання; достатньої ширини зрізу; усунення коливань конструкцій; плавного й автоматичного регулювання робочих швидкостей.

Для повного й швидкого розвантаження ковшових робочих органів необхідно прагнути до оптимального обрису внутрішньої поверхні (розширення убік руху ґрунту); до забезпечення захисту від налипання ґрунту й намерзання [26, 38, 39].

1.3. Огляд та аналіз досліджень в області застосування відвального обладнання землерийних машин з просторово орієнтованими ножами

Основним напрямом зниження енергоємності виконання планувальних робіт та робіт із розробки верхнього шару ґрунту та його переміщення на будівельних об'єктах є використання землерийної машини з відвальним робочим обладнанням.

Відвал - це навісне обладнання для бульдозерів, тракторів, автогрейдерів, навантажувачів, і автомобілів, яке використовується для розробки ґрунтів, снігоприбиральних та інших робіт (рис. 1) [28, 29, 30]. Здебільшого відвал являє собою зварну металеву конструкцію коробчастого перерізу. Вздовж нижньої крайки відвала прикріплені ножі. З обох боків відвала приварені бічні пластини, призначені для запобігання розсипанню переміщуваного матеріалу. За допомогою відвала машина може переміщати великі обсяги вантажу за один цикл роботи але, на відміну від ковшів, відвали непридатні для вантаження ґрунту на транспортні засоби [31].



Рисунок 1.3. Колісний бульдозер із відвальним обладнанням

Особливості застосування колісних бульдозерів, є їхня мобільністю та швидкістю. Колісні бульдозери ідеально підходять для переміщення великих обсягів ґрунту, піску, гравію або щебеню на короткі та середні відстані. Завдяки високій швидкості, вони швидко переміщуються між робочими зонами, що значно підвищує продуктивність. Також, їхня маневреність дозволяє ефективно працювати в умовах обмеженого простору.

Перевагами колісного бульдозера, являються:

1. Висока швидкість і мобільність: Легко пересуваються між об'єктами без необхідності використання транспортера.
2. Менший тиск на ґрунт: Шини створюють менший тиск на поверхню, що дозволяє працювати на м'яких ґрунтах без значних пошкоджень.
3. Універсальність: Можуть працювати з різними видами навісного обладнання (відвали, розпушувачі, тощо).

А недоліками колісного бульдозера, є:

1. Менше зчеплення: На слизьких, вологих або крутих схилах зчеплення коліс з ґрунтом гірше, ніж у гусениць.
2. Нижче тягове зусилля: Гусеничні бульдозери мають більше зчеплення, що забезпечує значно вище тягове зусилля для роботи з твердими ґрунтами.



Рисунок 1.4. Гусеничний бульдозер із відвальним обладнанням

На відміну від колісних, гусеничні бульдозери мають значно вище зчеплення та тягове зусилля, що робить їх незамінними для роботи у складних умовах. Гусеничні бульдозери є основним типом машин для переміщення великих обсягів ґрунту на короткі відстані. Вони ідеально підходять для пошарового зрізання ґрунту, планування майданчиків та прокладання доріг. Застосовуються для розробки гірських порід та корисних копалин у кар'єрах. Завдяки своєму тяговому зусиллю вони можуть ефективно працювати з кам'янистим і мерзлим ґрунтом.

Перевагами гусеничного бульдозера, являється:

1. Високе тягове зусилля: Гусениці забезпечують максимальне зчеплення з ґрунтом, що дозволяє працювати на схилах, в'язких і мокрих ґрунтах.
2. Низький питомий тиск: Велика площа контакту гусениць з поверхнею зменшує тиск на ґрунт, що дає змогу працювати на слабких ґрунтах, уникаючи їх сильного ущільнення.
3. Довговічність: Гусеничні стрічки розраховані на роботу в жорстких умовах.

А його недоліками, є:

1. Низька швидкість: Гусеничні бульдозери повільні та не придатні для швидкого переміщення між об'єктами.
2. Пошкодження дорожнього покриття: Гусениці пошкоджують асфальтне покриття, тому для перевезення їх між об'єктами використовують трали.



Рисунок 1.5. Гусеничний бульдозер із відвальним обладнанням ковшового типу

Особливості застосування гусеничних бульдозерів із відвальним обладнанням ковшового типу полягають у поєднанні високого тягового зусилля гусениць зі здатністю відвалу утримувати великий об'єм матеріалу. Ця конфігурація призначена для максимально продуктивного переміщення сипких матеріалів на середні відстані.

Завдяки своїй U-подібній формі та бічним крилам, відвал ковшового типу може захоплювати та переміщувати на 30-40% більше матеріалу, ніж прямий відвал. Це робить таку техніку ідеальною для великомасштабних земляних робіт, таких як будівництво дамб, насипів і гребель. Відвал ефективно утримує легкі та сипкі матеріали (пісок, гравій, вугілля), запобігаючи їх розсипанню по краях.

Перевагами таких бульдозерів, є:

1. Висока продуктивність: Гусениці забезпечують необхідне зчеплення для штовхання великих обсягів матеріалу, а ковшовий відвал максимізує обсяг за один прохід.
2. Ефективність: Зменшується кількість проходів, необхідних для переміщення заданого об'єму, що економить час та паливо.
3. Зниження втрат: Бічні крила відвалу зменшують втрати матеріалу, що переміщується.

А недоліками, в свою чергу, являються:

1. Обмежена маневреність: Через великий розмір відвалу така техніка менш маневрена в обмеженому просторі.
2. Непридатність для точного планування: Ця конфігурація менш підходить для робіт, що вимагають високої точності (наприклад, фінішного планування) через великий об'єм і кривизну відвалу.

Також є, ще інші види будівельної техніки, такі як екскаватор, грейдер і т.д., які використовують відвал у якості основного або допоміжного робочого обладнання.



Рисунок 1.6. Гусеничний екскаватор із відвальним обладнанням



Рисунок 1.7. Автогрейдер із відвальним обладнанням

Відвали бувають поворотні та неповоротні, а також їх поділяють за формою:

- Прямий відвал – короткий відвал, без бічного вигину та без бічних пластин.

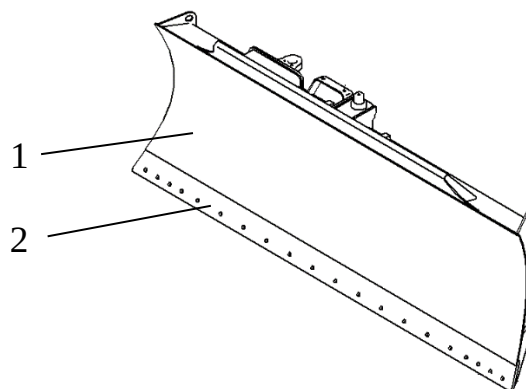


Рисунок 1.8. Прямий відвал

1 – відвал; 2 – ніж відвалу

- Напівсферичний відвал – відвал із меншими кутами вигину бокових частин, із встановленими бічними пластинами або без них.

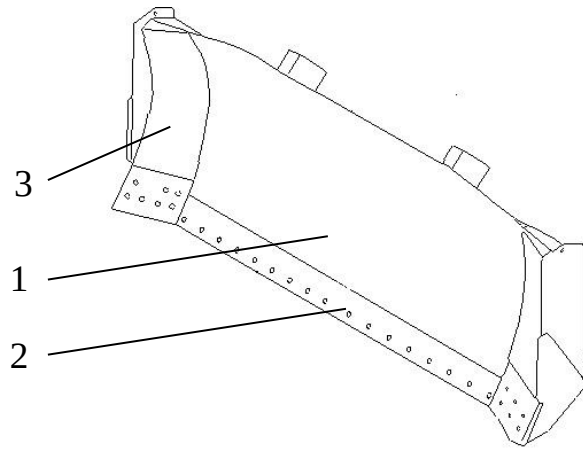


Рисунок 1.9. Напівсферичний відвал

1 – відвал; 2 – ніж відвалу; 3 – бокові пластини

- Універсальний (сферичний) відвал – відвал із великими кутами вигину бокових частин та встановленими бічними пластинами для транспортування великої кількості матеріалу (рис. 1.11).

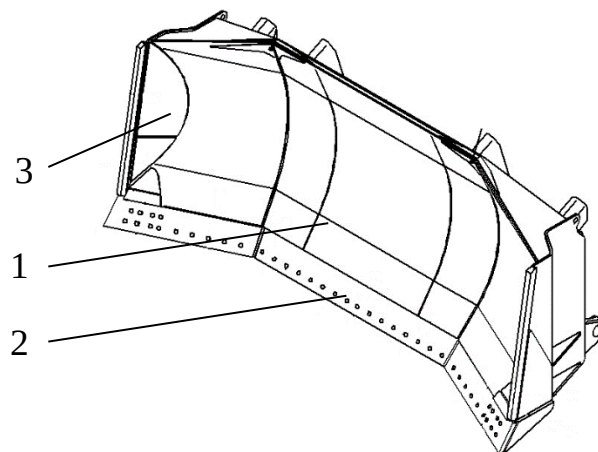


Рисунок 1.10. Універсальний відвал

1 – відвал; 2 – ніж відвалу; 3 – бокові пластини

Ножі відвалу - це спеціальна ріжуча накладка яка кріпиться на робоче обладнання землерийних та інших машин.

Ножі є ріжучою кромкою відвалу і можуть бути виготовлені з різних матеріалів та встановлюватись під різними кутами (рис. 1.11). Вони є замінними, оскільки, захищають відвал від зносу.

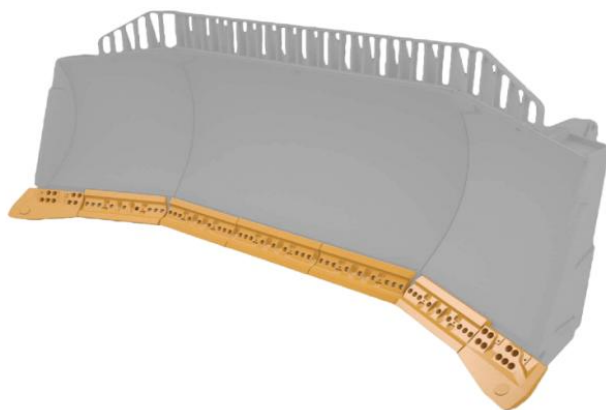


Рисунок 1.11. Ножі відвалу

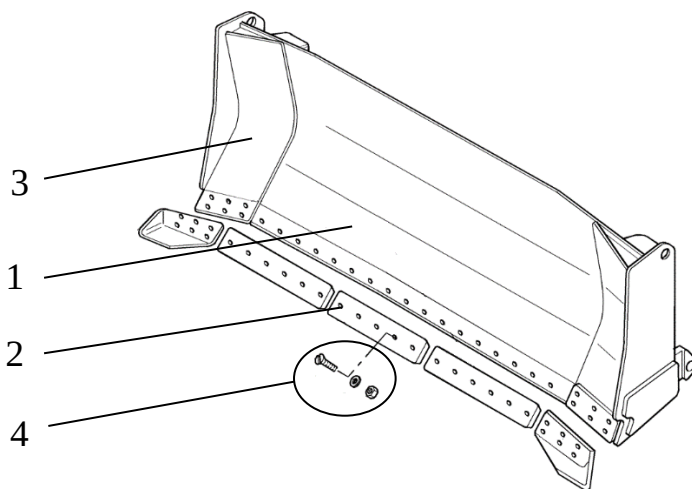


Рисунок 1.12. Кріплення ножів відвалу

1 – відвал; 2 – ніж відвалу; 3 – бокові пластини; 4 – болтове з'єднання

1.4. Аналіз розроблених технічних рішень проведенням патентного пошуку та пошукових запитів

Для пошуку та подальшого аналізу розроблених технічних рішень проведено патентний пошук та аналіз запитів («Відвал бульдозера» «Bulldozer blade», «Бульдозерне обладнання» «Bulldozer equipment», «Різання ґрунтів» «Soil cutting», «Просто-

рово орієнтований» «Spatially oriented») в мережі інтернет за останні п'ять років. За допомогою аналітичного інструменту «Google Trends» (<https://trends.google.com/trends/>) [32].



Рисунок 1.13. Графік пошукових запитів «Просторово орієнтований» за п'ять років



Рисунок 1.14. Графік пошукових запитів «Відвал бульдозера» за п'ять років



Рисунок 1.15. Графік пошукових запитів «Бульдозерне обладнання» за п'ять років



Рисунок 1.16. Графік пошукових запитів «Різання ґрунтів» за п'ять років

Популярність за регіона... ? Область ▾ ☰ ⬇ ⌂ 🔗

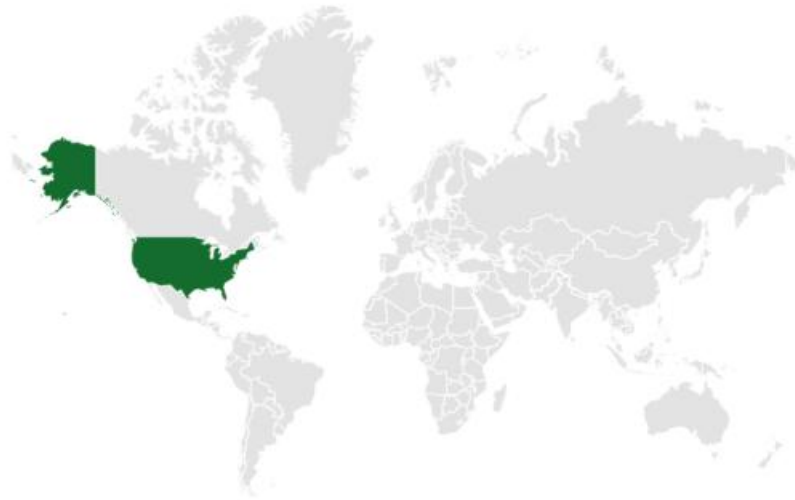


Рисунок 1.17. Розподілення за країнами пошукових запитів
«Просторово орієнтований»

Популярність за регіона... ? Область ▾ ☰ ⬇ ⌂ 🔗



Рисунок 1.18. Розподілення за країнами пошукових запитів «Відвал бульдозера»

Популярність за регіона... ? Область ▾ ☰ ⬇ ⏪ ⏩ 🔗



Рисунок 1.19. Розподілення за країнами пошукових запитів
«Бульдозерне обладнання»

Популярність за регіона... ? Область ▾ ☰ ⬇ ⏪ ⏩ 🔗

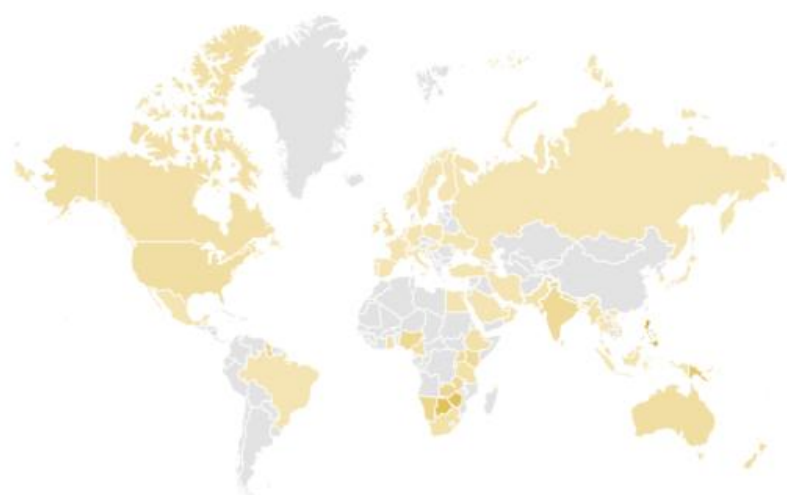


Рисунок 1.20. Розподілення за країнами пошукових запитів «Різання ґрунтів»

Для пошуку патентної документації використовувались джерела інформації із глобальної мережі інтернет, а саме бази даних:

«Google Patents» (patents.google.com) [33],

«Espacenet» (espacenet.com) [34],

«База патентів України»(uapatents.com) [35].

На основі джерел інформації визначимо регламент пошуку (табл. 1).

Згідно з міжнародною патентною класифікацією [36] необхідна документація потрапляє до класу E02F 3/815.

Таблиця 1.1. Регламент пошуку

Предмет пошук	Класи за МПК	Джерела інформації
Пристосування для вирівнювання або розрівнювання.	E02F 3/815	«Google Patents»: patents.google.com «Espacenet»: espacenet.com «База патентів України»: uapatents.com

За результатами патентного пошуку [37], для подальшого аналізу було відібрано тридцять три патенти з ретроспективною пошуку в тридцять п'ять років, оскільки з 1986 року почалось патентування релевантних технічних рішень, які відповідають сучасним конструкціям. Графік (рис. 1.21) було поділено на сім періодів. Межі одного періоду п'ять років.

На початку патентну документацію було розподілено за кількістю патентів та роком подання заявки, щоб зрозуміти динаміку патентування, в результаті ми зможемо побачити чи присутній інтерес до напрямку, пристосувань для вирівнювання або розрівнювання. Розподілення патентів наведено на (рис. 1.22).



Рисунок 1.21. Розподілення патентів за роком подання та кількістю

Як можна бачити, інтерес до даного напрямку з'явився у 1986 році, однак не отримав значного поширення до 2000 року. У цей період було запатентовано шість технічних рішень. Два з 1986 року по 1990 рік, три патенти з 1991 року по 1995 рік та лише один патент з 1996 року по 2000 рік.

Значний інтерес до пристроїв для вирівнювання або розрівнювання з'являється в період з 2001 року до 2005 року. Тоді було запатентовано сім технічних рішень за даним напрямком.

Ріст зацікавленості продовжився з 2006 року до 2010 року і було запатентовано ще вісім технічних рішень.

На графіку можна бачити значне посилення інтересу у період 2011 - 2015 р.р. коли було запатентовано десять технічних рішень.

Варто зауважити, що за період з 2001 до 2015 року кількість патентувань технічних рішень сягнула двадцяти п'яти, це було спричинено знаним збільшенням спектру використання пристроїв для вирівнювання та розрівнювання у різних галузях.

Однак пізніше, починаючи з 2016 року інтерес до пристосувань значно знизився, але роботи в цьому напрямку тривають.

Проаналізувавши патенти за кількістю та роком подання заявки, ми перейшли до розподілу за датою подачі заявки та кількістю патентів від країни-заявника у пе-

вний проміжок часу, що дасть змогу зрозуміти в яких країнах та в який час проводилась активна робота над пристосуваннями для вирівнювання або розрівнювання, та які країни приділяють найбільшу увагу цьому напрямку.

Розподілення патентів за країнами-заявниками представлено на (рис. 1.22).

Роботи почались в Євросоюзі у період з 1986 року до 1990 року, де було запатентовано два технічних рішення.

У період з 1991 до 2000 року роботи проводились в Японії та ЄС, у результаті було запатентовано ще три технічні рішення.

Починаючи з 2001 року у США та Росії було запатентовано один патент, та п'ять у ЄС.

У період 2006 - 2010 років у США було розроблено два технічних рішень, два в Росії та чотири в ЄС.

Активніше проводилась робота в США, де в період з 2011 до 2015 р.р. було отримано чотири патенти, два патенти в Росії, та один в ЄС. Одночасно розпочались роботи в Україні де було запатентовано три патенти.

У періоді з 2016 року до 2020 року в США та ЄС було запатентовано по одному технічному рішенню.

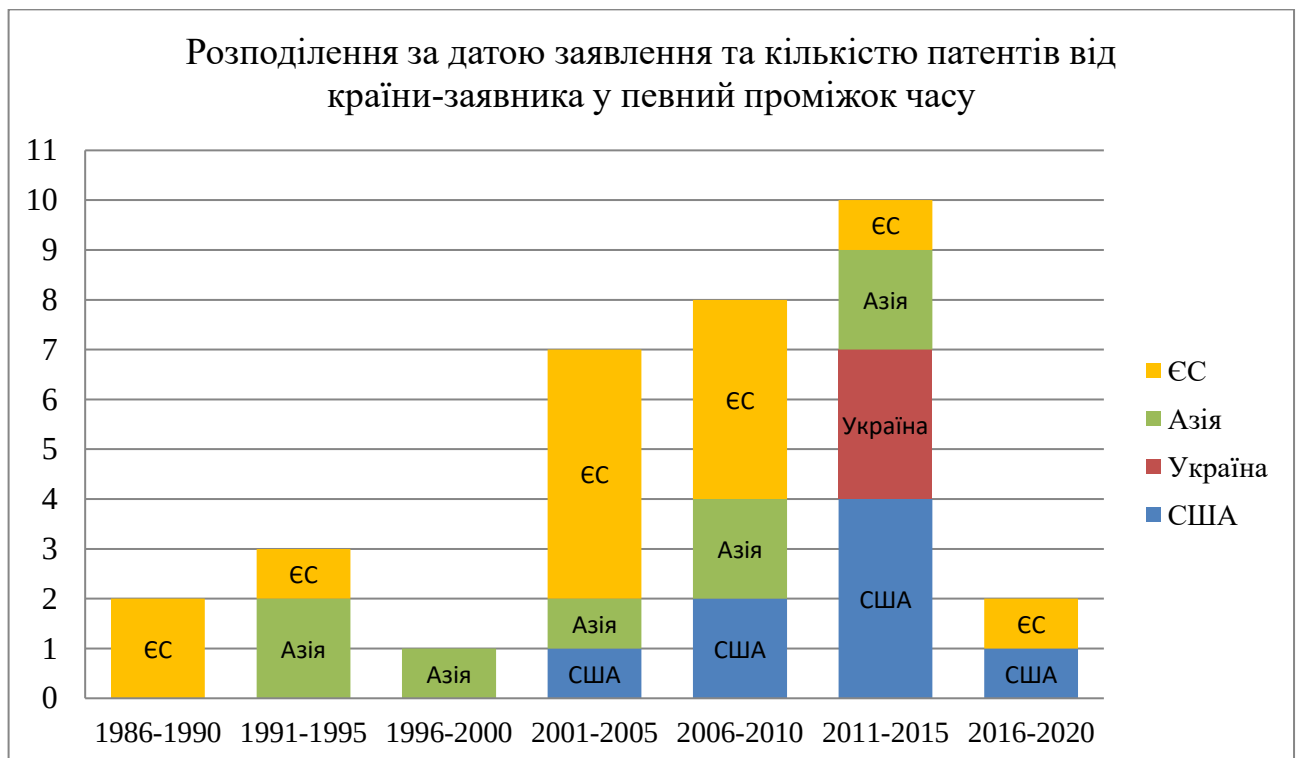


Рисунок 1.22. Розподілення патентів за роком та країною патентування

За результатами аналізу ми встановили, що значна частина патентів належить приватним особам. Розподіливши патенту документацію за роком подання та кількістю було встановлено, що проблема пристосувань для вирівнювання або розрівнювання зберігає постійну актуальність.

На розглянутому проміжку часу з 1986 до 2020 рік ми зафіксували повільний ріст актуальності даної проблеми зі значним сплеском інтересу в період з 2001 - 2015 роки, що спричинено розширенням спектру використання відвального обладнання [40].

У результаті аналізу патентів за організацією-власником, ми встановили, що вирішенням даної проблеми займалися виробники обладнання, науково-освітні установи та приватні особи.

Наведено кілька прикладів пристосувань для вирівнювання або розрівнювання з проаналізованих патентів.

Відвал бульдозера 1 з об'ємною ножовою системою (рис. 1.25) включає основні 2 та виступні ножі 3 та бічні косинки 4.

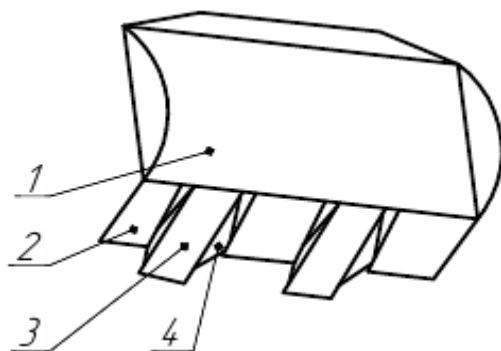


Рисунок 1.23. Відвал з об'ємною ножовою системою

Новим є те, що обабіч кожного з основних і виступних ножів попарно встановлені бічні косинки так, що кут між ріжучими краями їх бічних граней, спроектований на площину відповідного ножа, дорівнює куту бічного розвалу ґрунту при його копанні основним чи виступним ножом на критичній глибині, кут між проекцією кожного з ріжучих країв бічних граней бічних косинок у плані на горизонтальну площину і напрямком подовжнього руху відвала бульдозера є гострим, ріжучі краї

основних і виступних ножів у профільній проекції зміщені по довжині й висоті в межах товщини стружки копання ґрунту, бічні косинки основних ножів мають спільне ребро з бічними косинками виступних ножів, а кут копання ґрунту виступними ножами менший кута копання ґрунту основними ножами.

Технічний результат: зниження енергоємності копання ґрунту за рахунок заміни блокованого копання напіввільним чи вільним, застосування косого копання ґрунту елементами об'ємної ножової системи, поліпшення нагромадження і переміщення ґрунту об'ємною ножовою системою в призму і зменшення втрат відділеного від основного масиву ґрунту в зоні ножової системи [41].

Відвал бульдозера 1 з комбінованою ножовою системою 2 включає традиційний неповоротний відвал і ріжучі ножі (рис. 1.26).

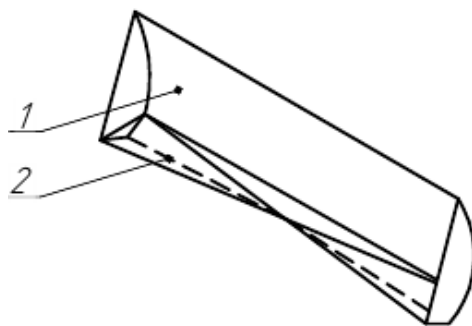


Рисунок 1.24. Відвал з комбінованою ножовою системою

При цьому ріжучі ножі виконані з окремих пластин і з'єднані між собою попарно й з відвалом так, що ріжучі краї розташовані симетрично відносно подовжньої вертикальної площини симетрії відвала під заданим кутом між собою у фронтальній і вертикальній проекції, а пластини ножів встановлені під гострим кутом до горизонталі таким чином, щоб забезпечити виключно косе копання ґрунту.

Технічний результат: зниження енергоємності копання ґрунту бульдозерним відвалом, поліпшення нагромадження та переміщення ґрунту по відвалу та зменшення втрат ґрунту в бокові валики шляхом використання виключно косого копання ґрунту, створення умов спрямування відділеної від масиву ґрунтової стружки всередину призми ґрунту перед відвалом, заміна блокованого копання ґрунту напіввіль-

ним чи вільним і утворення плоскої чи неплоскої поверхні ґрунту після проходження бульдозерного відвала.

Найбільш цікавим на наш погляд, є технічне рішення представлене на (рис. 1.27), що складається з відвалу 1 з гребінчастим ножом косого різання 2 [42].

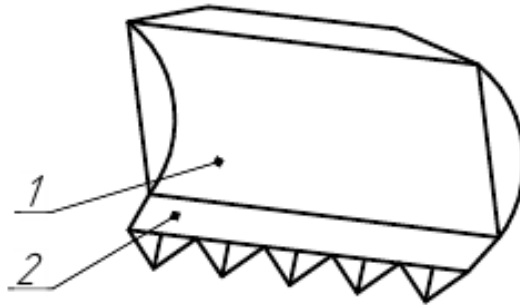


Рисунок 1.25. Відвал з гребінчастим ножом косого різання

1.5. Постановка задачі

Таким чином науково-обґрунтовані дані необхідні для рекомендацій з використання рухомих просторово орієнтованих ножів відвального обладнання землерийної техніки, можуть бути отримані на основі результатів спеціальних досліджень.

У відповідності з темою, метою роботи є подальший розвиток наукових основ розробки ґрунтів просторово орієнтованими рухомими ножами на основі встановлення закономірностей впливу просторово орієнтованих рухомих ножів на ґрунт та розробки методів і моделей – обґрунтування параметрів будівельних машин для підвищення їх надійності та ефективності.

Для досягнення поставленої мети вирішенню підлягають наступні задачі:

1. Створити аналітичну модель просторово орієнтованих ножів
2. Розробити моделі взаємодії просторово орієнтованих ножів із ґрунтом;
3. Встановити закономірності та визначити залежності які характерні при взаємодії просторово орієнтованих ножів із ґрунтом;
4. Запропонувати конструктивні рішення з обґрунтованими параметрами;
5. Розробити методику та програму лабораторних досліджень;
6. Провести експериментальні дослідження, після чого провести порівняльний аналіз, теоретичних та експериментальних результатів досліджень;

Висновки по розділу 1

На основі проведеного аналітичного дослідження, дозволяє зробити наступні висновки:

1. Процес різання ґрунтів є складною, енергоємною операцією, яка має циклічний, коливальний характер. Основні характеристики цього процесу, енергоємність та кінематика, значною мірою залежать від геометричних параметрів ріжучого інструменту та умов його взаємодії з ґрунтом. Одним із ключових показників, що відображає особливості процесу, є тип стружкоутворення, який може бути зливним, ступінчастим, елементним або відривним. Для підвищення ефективності та зниження енергоємності роботи землерийних машин необхідно враховувати не лише властивості ґрунту, але й оптимальні геометричні та кінематичні параметри ріжучого інструменту. Характер стружкоутворення є важливим індикатором ефективності процесу різання. Завдяки дослідженням встановлено, що існує оптимальний діапазон кутів (кут різання $35-40^\circ$, кут повороту в плані $30-45^\circ$), який дозволяє досягти найбільш продуктивного і найменш енергоємного різання ґрунту, мінімізуючи витрати енергії на пластичні деформації та зменшуючи амплітуду коливань сил різання.

2. Ефективність роботи землерийних машин визначається комплексом взаємопов'язаних факторів, що охоплюють властивості ґрунту, конструкцію робочого органу та умови їхньої взаємодії. Основним викликом є змінна та істотна сила різання, що становить значну частину загального навантаження на виконавчий механізм і залежить від коливального характеру процесу, мінливості ґрунту та кінематичних і геометричних параметрів. Щоб підвищити раціональність конструкції робочих органів і, як наслідок, продуктивність машин, необхідно мінімізувати енергоємність різання, обмежувати розміри відокремлюваних кусків, забезпечувати рівномірність робочого режиму та сприяти ефективному розвантаженню ковшів. Зниження енергоємності досягається, зокрема, шляхом оптимізації форми та розмірів різальних елементів, щоб більша частина руйнування ґрунту відбувалася в зонах з мен-

шим питомим опором, а також завдяки правильному вибору кутів різання та запобіганню зносу. Таким чином, раціональне проєктування землерийних машин вимагає глибокого розуміння фізичних процесів взаємодії з ґрунтом і спрямоване на узгодження кінематики руху робочого органу з принципами мінімізації опору різанню для досягнення максимальної продуктивності.

3. Для визначення актуальності пристосувань для вирівнювання та розрівнювання та подальшого аналізу технічних рішень нами було проведено патентний пошук. У результаті пошуку відзначено 33 патентних рішення, що відповідають меті дослідження. Встановлено, що даним напрямком займалися різні типи осіб: приватні особи, науково-освітні установи, науково-дослідні інститути та організації-виробники обладнання. - це свідчить про актуальність та важливість даної проблеми. Встановлено що дослідження різання ґрунтів рухомими просторово-орієнтованими ножами, є актуальним для досягнення зменшення енергоємності процесу різання ґрунтів.

Основні наукові результати по даному розділу опубліковані у працях [38, 39, 40]

РОЗДІЛ 2. СИЛОВИЙ ТА ЯКІСНИЙ АНАЛІЗ РОБОТИ ВІДВАЛУ ЗЕМЛЕРИЙНОЇ ТЕХНІКИ З РУХОМИМИ ПРОСТОРОВО ОРІЄНТОВАНИМИ НОЖАМИ

У розділі досліджено геологічну карту «Українського кристалічного щита», на якій виявлено найпоширеніші ґрунти на території України, а саме, мергелі, суглинки та глинисті глини.

Виведено робочу гіпотезу, руху просторово-орієнтованих ножів на відвалі бульдозера, де встановлено, що при розробці ґрунту на різних швидкостях переміщення базової машини та руху просторово орієнтованого відбувається відхилення вектора прикладання сили різання на кут (α), що в свою чергу впливає на геометричну взаємодію просторово-орієнтованого ножа з робочим середовищем. Зміна геометричної взаємодії просторово орієнтованого ножа з ґрунтом впливає на силу різання, що зумовило створення параметричної моделі взаємодії просторово-орієнтованих ножів з робочим середовищем. Модель була розроблена для різних конфігурацій ножів і різних співвідношень швидкості бульдозера до швидкості руху просторово орієнтованого ножа.

Була створена розрахункова модель, відповідно до робочої гіпотези, де було отримано п'ять планів руху просторово орієнтованих ножів відвального обладнання, у кореляції до відхилення прикладеної повної сили різання на кут α . Проведено розрахунок сил різання ґрунту на різних глибинах при роботі рухомих просторово орієнтованих ножів робочого органу.

2.1 Загальні положення. Особливості роботи просторово орієнтованих рухомих ножів

Під час роботи землерийної машини її виконавчий механізм взаємодіє з ґрунтом, руйнуючи і відокремлюючи його від масиву.

Основними характеристиками процесу копання є геометричні, кінематичні, силові та енергетичні параметри, а також показники, що визначають фізичні особ-

ливості руйнування ґрунту, і властивості ґрунту як об'єкта взаємодії, конструкція робочого органу та умови взаємодії робочого органу з ґрунтом [43].

Особливістю процесу копання є те, що його силові та енергетичні показники залежать від кінематичних умов і від геометричних параметрів - товщини, ширини і площі перерізу, а також від кутів орієнтації робочого органу в просторі.

Більшість розрахунків ножів і зубів землерийної техніки ґрунтується на тому, що її параметри не змінюються під час взаємодії робочого органу з ґрунтом. Зміна параметрів при багатовекторній дії частин робочого органу досліджена недостатньо. Тому питання створення методики визначення параметрів просторово-орієнтованого ножа динамічної дії є особливо актуальним.

Український кристалічний щит [44], вкритий невеликим шаром палеоген-неогенових осадових порід, представлених вапняками, пісками, алевролітами, залізистими кварцитами тощо. У річкових долинах відслонюються корінні магматичні породи архею - протерозою - гнейси, граніти, кварцити, діорити тощо.

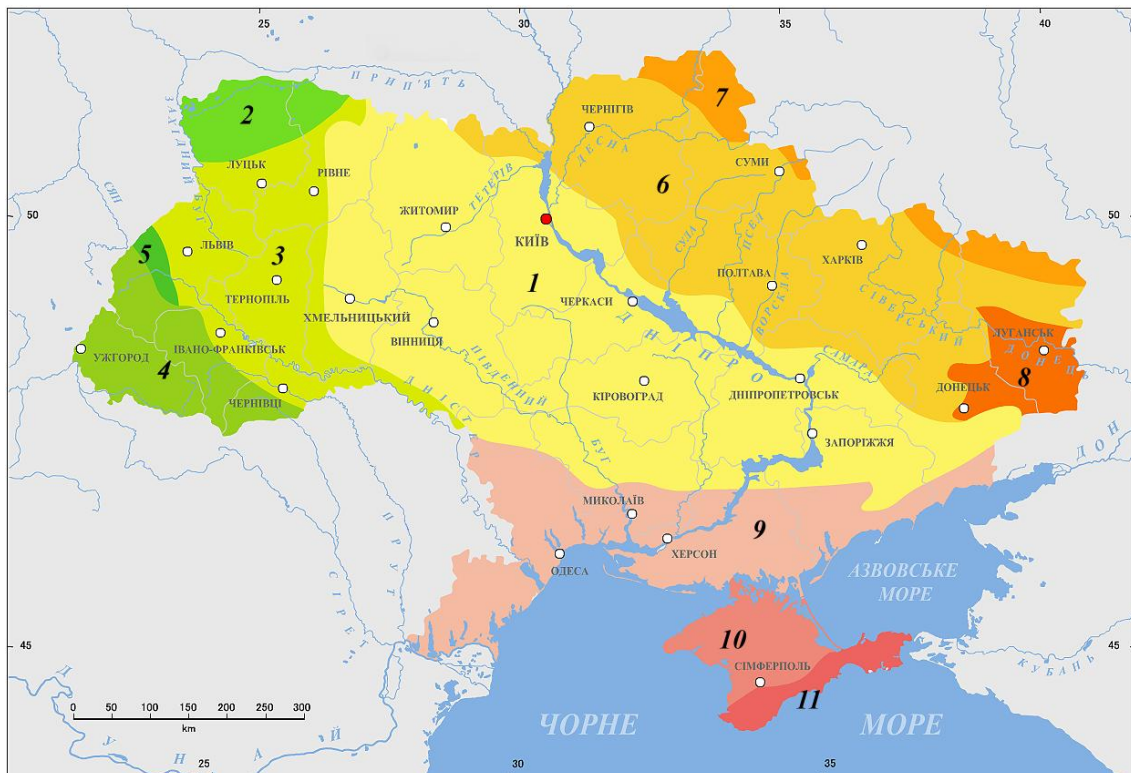


Рисунок 2.1. Карта розподілення «Українського кристалічного щита»

На схилі щита осадові породи залягають потужніше, але на поверхню виходять неогенові міоценові та пліоценові відклади - глини, алевроліти, піски.

Антропогенні відклади представлені плейстоценовими делювіальними суглинками та лесами.

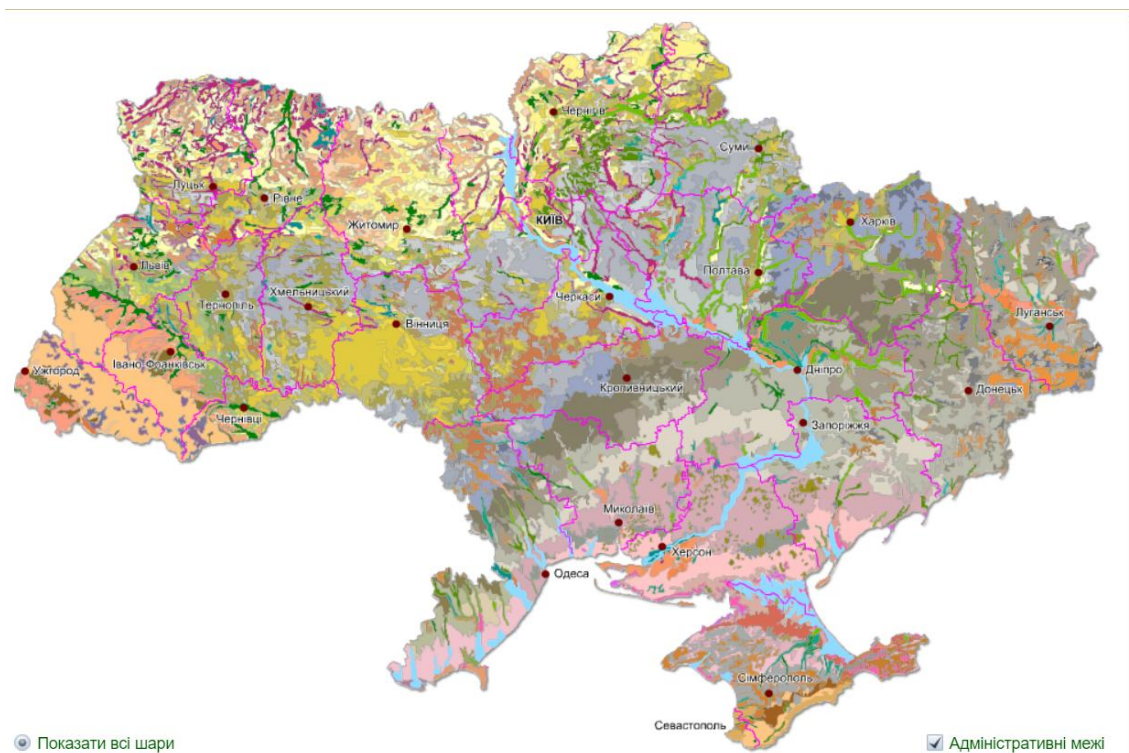


Рисунок 2.2. Карта ґрунтів України

На рисунку 2.2, зображено карту розподілення ґрунтів України [45]. Територія України характеризується значним різноманіттям ґрунтового покриття, що відображено на карті, де домінують чорноземи, які мають пухку структуру, та дерново-підзолисті й сірі лісові ґрунти.

Відмінності у механічному складі та фізико-хімічних властивостях ґрунтів є критичними для ефективності земельно-будівельних робіт. Зокрема, робота бульдозером вимагає врахування типу ґрунту: чорноземи та легкі суглинки розробляються легко з високим коефіцієнтом наповнення відвалу.

Тоді як для важких суглинків, глинистих та кам'янистих ґрунтів необхідне попереднє розпушування, застосування важчих машин, а також вибір оптимальних режимів різання, копання та пошарового зрізання для мінімізації енерговитрат і забезпечення стійкості машини. Розшифровка до карти вказана в додатку А.

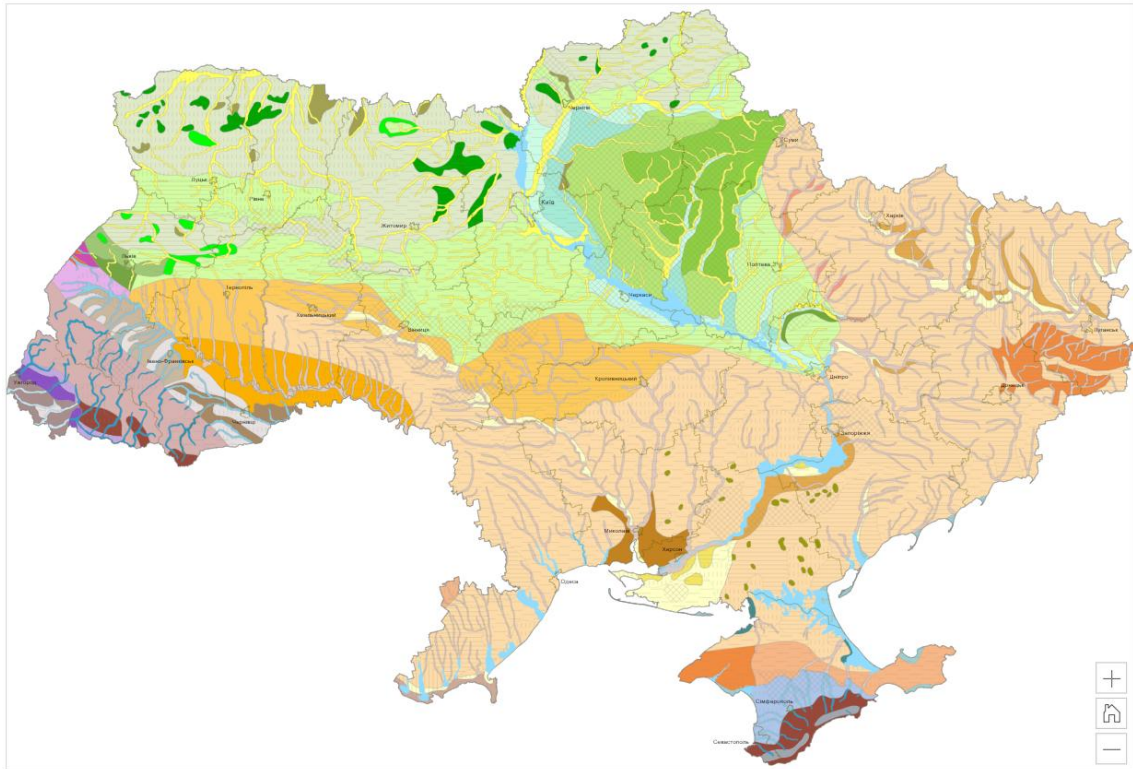


Рисунок 2.3. Інженерно геологічна карта України

Інженерно геологічна карта відображає розподіл поверхневих геологічних формацій, які тісно пов'язані з типом ґрунтів і значно впливають на умови роботи будівельної техніки. З інженерно-геологічної точки зору, робота бульдозером найбільш сприятлива у центральній частині України, де поширені лесові відкладення та покривні суглинки, які є відносно м'якими для розробки. Складніші умови для бульдозерних робіт формуються у західних гірських регіонах та на південному сході, де переважають щільніші осадові та магматичні породи, а також елювіальні та делювіальні відкладення з великим вмістом скельних включень. У цих областях для ефективної роботи бульдозера часто потрібне попереднє масивне розпушування, застосування важких бульдозерів із зубами-розпушувачами, а також вибір оптимальної технології різання та переміщення ґрунту, що враховує підвищений опір ґрунту різанню та потенційний знос робочого обладнання [46, 47, 48, 117, 118].

Дослідивши дані карти, було з'ясовано, що основними ґрунтами, з якими працює бульдозер, є піски, супіски, суглинки легкі та важкі, мергелисті глини і аргіліти.

Для обраних ґрунтів були визначені фізико-механічні характеристики і занесені до таблиці 2.1 і 2.2.

Таблиця 2.1. Питомий опір ґрунту

Ґрунт	m_f , МПа	m_s , МПа	$m_{s,c}$, кН/м
Мергелиста глина	0,3	0,021	0,4
Суглинок	0,15	0,013	1,42
Аргіліт	0,25	0,024	5,47

Таблиця 2.2. Фізичні характеристики ґрунтів

Ґрунт	Розмірні характеристики зони руйнування		
	μ	k_s	γ
Мергелиста глина	14°	0,8	30°
Суглинок	18°	0,85	40°
Аргіліт	16°	0,9	30°

Різнання є основним методом механічної розробки ґрунтів. Основними геометричними умовами пропонується вважати положення кромки ріжучого клину відносно напрямку різання і поверхні масиву, контури ріжучої кромки, контури і кількість робочих поверхонь ріжучої кромки, кількість так званих бічних поверхонь різання і так званих заблокованих поверхонь різання [27, 115, 116].

Особливістю процесу різання є те, що його силові та енергетичні показники залежать від кінематичних умов і від геометричних параметрів - товщини, ширини і площі зрізу, а також від кутів орієнтації робочого органу в просторі.

На основі цих характеристик виділяють різновиди процесу і створюють класифікацію видів різання.

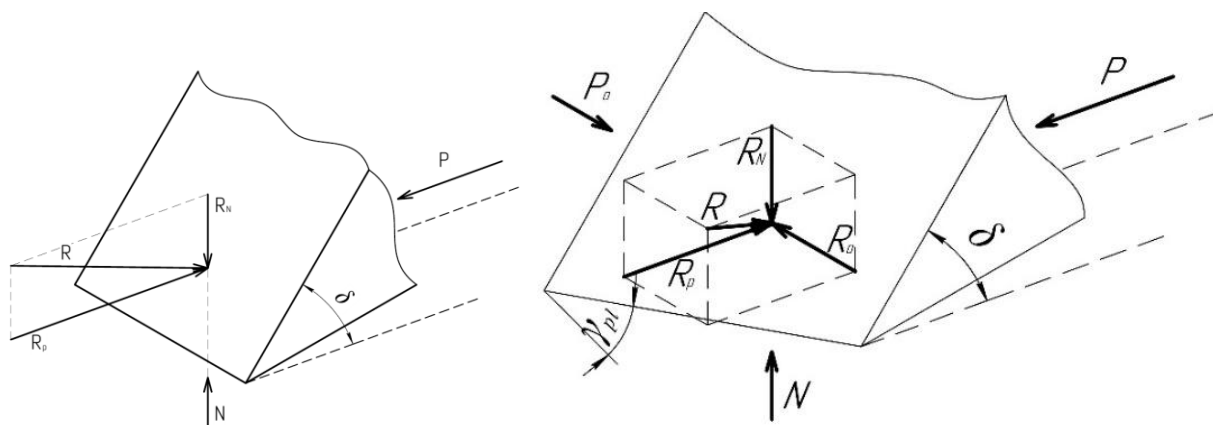


Рисунок 2.4. Основні складові сили різання та опори різанню

Де:

P – лобова сила різання;

N – сила різання по нормалі;

P_o – ортогональна сила різання;

δ – кут різання;

γ_{pl} – кут повороту ножа в плані;

R – опори ґрунту різанню

Під час роботи землерийної машини з косим різанням взаємодія ножа з ґрунтом має просторовий характер, що проявляється в утворенні несиметричної щілини (рис. 2.5. б) трапецієподібного поперечного перерізу. Для того, щоб кількісно оцінити вплив просторового процесу, пропонується розглядати силу P як складову частин, що відповідають характеру опору ґрунту на різних ділянках зони руйнування перед ножом. Таким чином, зусилля P косого різання ґрунту визначається як сума трьох складових P_f - зусилля подолання опору ґрунту передньою кромкою ножа, P_s - зусилля подолання опору ґрунту руйнуванню в бічних розширеннях щілини, і $P_{s.c}$ - зусилля подолання опору ґрунту, що зрізається бічними кромками ножа.

Різницю між P_f при прямокутному зрізі і P_f при косому зрізі пропонується враховувати коефіцієнтом φ_f , який залежить від співвідношення h/b і кута γ_{pl} повороту ножа в плані

Сили P_s і $P_{s.c}$ залежать, крім властивостей ґрунту, тільки від товщини зрізу і кута повороту ножа в плані. Вплив кута повороту ножа в площині на зміну цих сил враховується коефіцієнтами φ_s і $\varphi_{s.c}$.

Співвідношення h/b між товщиною і шириною зрізу, при збільшенні товщини зрізу розміри бічних розширень пропорційно збільшуються, в той час як при зміні ширини вони залишаються постійними. Після того, як товщина зрізу досягає так званої критичної глибини різання, збільшення бічного розширення щілини припиняється і починається інтенсивне розростання зон бічного зрізу ґрунту краями ножа. Ґрунт перед ножом за межами критичної глибини різання вдавлюється в масив з боків ножа і не відділяється від масиву. Тому критична глибина різання відповідає мінімальній енергоємності [3, 49, 50].

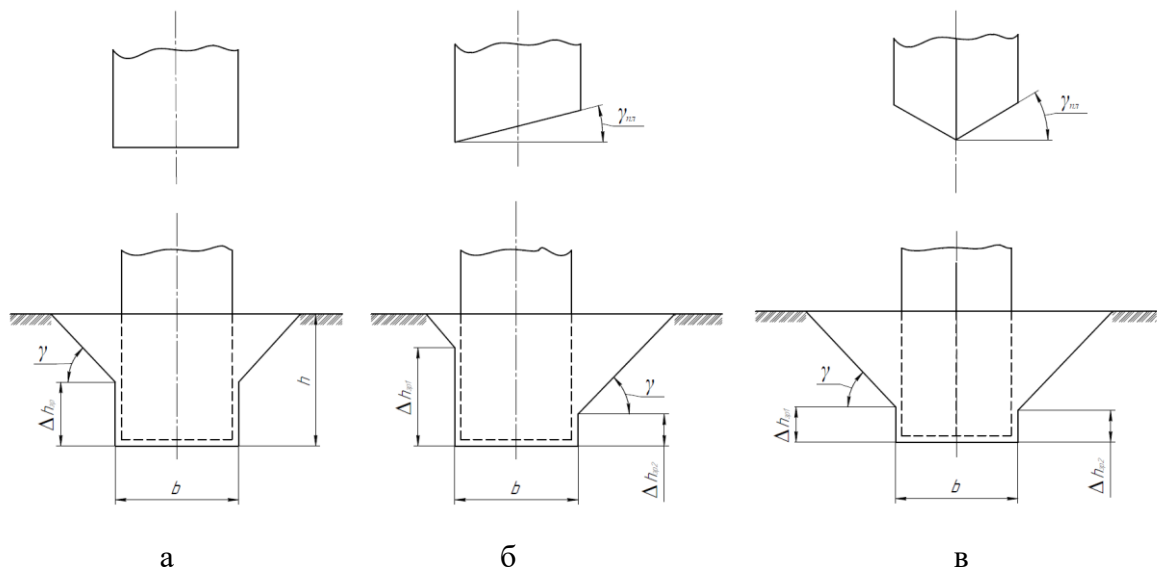


Рисунок 2.5. Зміна прорізи в залежності від орієнтації ножа в просторі
 а – прорізь при різанні прямим ножем; б – прорізь при різанні косим ножем;
 в – прорізь при різанні двограним ножем

2.2. Побудова робочої гіпотези, просторово орієнтованих рухомих ножів відвального обладнання

Робоча гіпотеза базується на тому, що рух просторово-орієнтованого ножа буде здійснюватися поздовжньо - поступальний рух, перпендикулярний до траєкторії руху робочого органу, при цьому залежності від співвідношень швидкостей переміщень буде з'являтися відхилення напрямку дії результуючої сили різання (рис. 2.7) [1]. На рисунку 2.6 схематично зображено робочу гіпотезу, що має забезпечити підрізання ґрунту та його легке виведення із зони розробки. Тим самим зменшуючи опори, які виникають при роботі бульдозера і збільшуючи його продуктивність, а також розширюючи область використання.

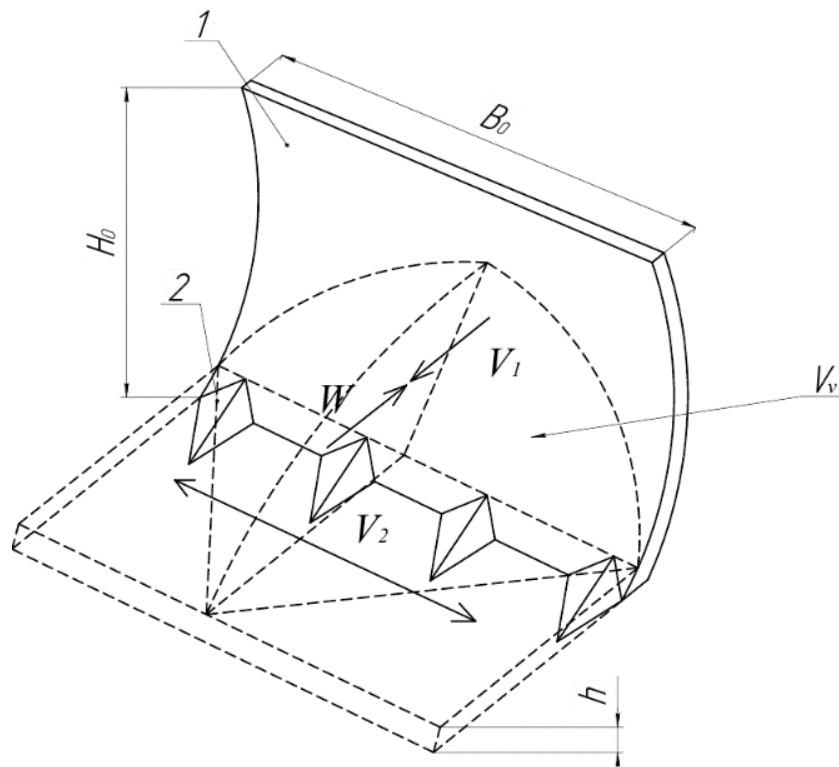


Рисунок 2.6. Схематичне зображення траєкторій руху робочого органу:

1 – бульдозерний відвал; 2 – рухомий просторово-орієнтований; $\bar{V}_1$ - траєкторія руху бульдозера; $\bar{V}_2$ - траєкторія руху просторово-орієнтованого ножа; B_o - ширина відвалу; H_o - висота відвалу; h - товщина шару, що зрізається; W – загальний опір призми волочіння

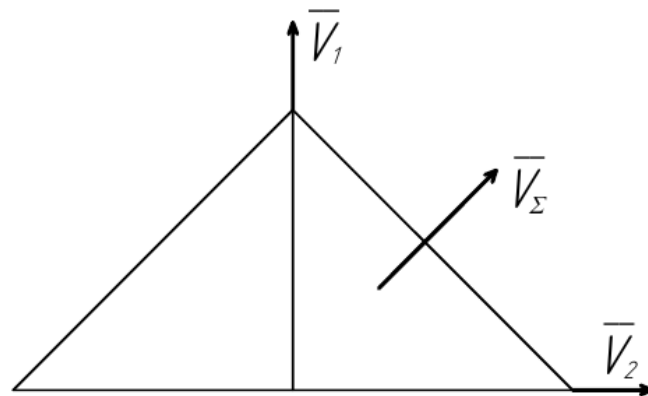


Рисунок 2.7. $\bar{V}_1$ – Вектор сили різання, відповідно траєкторії робочого органу; $\bar{V}_2$ – вектор сили різання рухомим просторово орієнтованим ножом; $\bar{V}_\Sigma$ – вектор загальної сили різання

При подачі леза в просторово орієнтований ніж з'являється вектор, в залежності від співвідношення, він має свої координати на осі Y , при переміщенні ножа з'являється вектор, який в свою чергу має свої координати на осі X . Щоб визначити вектор переміщення, підсумовуємо вектори за правилом паралелограма, оскільки вектори мають спільний початок координат (рис. 2.8).

Використовуючи дані, отримані під час розрахунку вектора, прикладаємо вектор, що вказує напрямок сили різання до просторово орієнтованого ножа динамічної дії, з урахуванням кута α , показника напрямку прикладання сили різання, можемо знайти зміну кута γ_{pl} повороту ножа в плані та зміну ширини b [52].

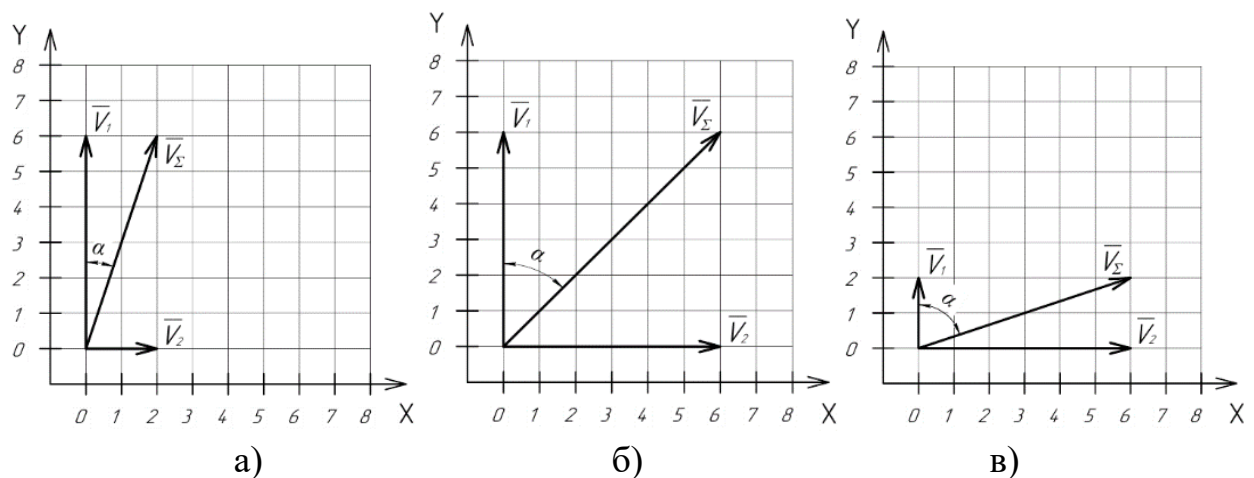


Рисунок 2.8. Визначення вектора напрямку сил різання та кута α :

- а - відхилення кута α у векторному відображенні співвідношення швидкостей руху бульдозерного відвалу швидше, ніж рух просторово-орієнтованого ножа;
- б - відхилення кута α у векторному відображенні співвідношення швидкостей руху бульдозерного відвалу таке ж, як і рух просторово-орієнтованого ножа;
- в - відхилення кута α у векторному відображенні співвідношення швидкостей руху бульдозерного відвалу менше, ніж рух просторово-орієнтованого ножа.

З отриманих графіків стає очевидним, що відхилення вектора кута α , прикладання результуючої сили різання можна обчислити за сумою векторів [53, 54, 67]. Для обчислення відхилення вектора на кут α , застосуємо формулу 2.1.

$$\alpha = \arccos \left(\frac{\Sigma V_x V_x + \Sigma V_y V_y}{\sqrt{\Sigma V_x^2 + \Sigma V_y^2} \cdot \sqrt{V_x^2 + V_y^2}} \right). \quad (2.1)$$

Кут відхилення сумарної сили різання α , розраховувався при співвідношенні швидкості переміщення бульдозера, до швидкості руху просторово-орієнтованого ножа, в діапазоні від 10:1 до 1:10 (рис. 2.9) .

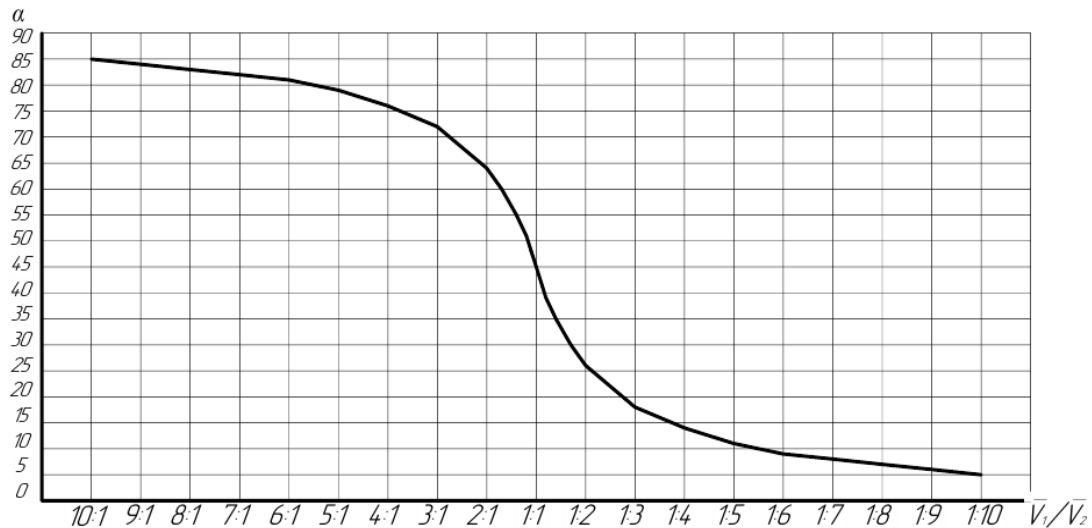


Рисунок 2.9. Графік залежності кута α від співвідношення тягової швидкості робочої машини $\bar{V}_1$ до швидкості руху просторово орієнтованого ножа $\bar{V}_2$

2.3. Параметризація просторово орієнтованих рухомих ножів відвального обладнання

Завдяки використанню двогранного ножа та робочої гіпотези ми отримуємо два кути $\gamma_{pl,y}$ і $\gamma_{pl,x}$ повороту в плані, які відповідають кожній з граней відносно переміщення базової машини та просторово орієнтованого ножа, і зміну ширини різання b . Ці параметри безпосередньо, впливають на ширину різання b , тому визначення ширини різання виводиться відповідно до вектора руху і розраховується за рівняннями (b_{com}), які наведені нижче. Критична глибина різання для більшості ґрунтів при нормальних кутах різання ножа, відношення h/b , глибини різання h до ширини ножа b_k знаходиться в діапазоні від 1 до 3. У нашому ж випадку, ширина різання змінна, тому вона буде врахована в тому ж діапазоні, але як відношення h/b_{com} .

Виведено дев'ять основних залежностей параметризації ножа від кута α , які охоплюють варіацію просторово орієнтованих ножів, для кута повороту в плані γ_{pl} від 1° до 179° :

- 3 для ножа, в якого кути повороту в плані $\gamma_{pl.y}$ та $\gamma_{pl.x} = 45^\circ$;
- 3 для ножа, в якого кути повороту в плані $\gamma_{pl.y} < 45^\circ$ та $\gamma_{pl.x} > 45^\circ$;
- 3 для ножа, в якого кути повороту в плані $\gamma_{pl.y} > 45^\circ$ та $\gamma_{pl.x} < 45^\circ$

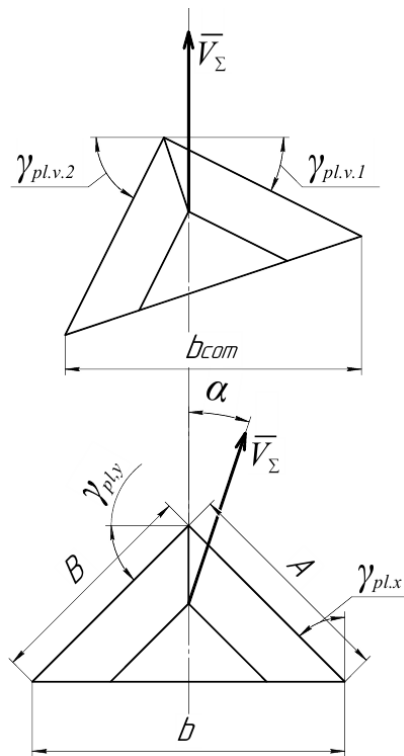


Рисунок 2.10. Параметризація просторово-орієнтованого ножа при

$$\gamma_{pl.y} > \alpha < \gamma_{pl.x}$$

Якщо $\gamma_{pl.y} > \alpha < \gamma_{pl.x}$ представлено на (рис. 2.10), то кути повороту в плані будуть мати вигляд:

$$\gamma_{pl.v.1} = \gamma_{pl.y} - \alpha, \quad (2.2)$$

$$\gamma_{pl.v.2} = \gamma_{pl.y} + \alpha. \quad (2.3)$$

Ширина прорізу відносно вектора:

$$b_I = A \cdot \cos(\gamma_{pl.v.1}), \quad (2.4)$$

$$b_{II} = B \cdot \cos(\gamma_{pl.v.2}). \quad (2.5)$$

Загальна ширина прорізу:

$$b_{com} = b_I + b_{II}. \quad (2.6)$$

З'ясовано що такій роботі рухомого просторово орієнтованого ножа, його грані та кромки будуть взаємодіяти з ґрунтом по різному, так як кожна з них буде мати свої геометричні параметри ширини b та кута повороту в плані γ_{pl} . Що в цілому, буде впливати на загальну силу різання ґрунтового масиву, так як їхні геометричні характеристики взаємодії з ґрунтом відрізняються.

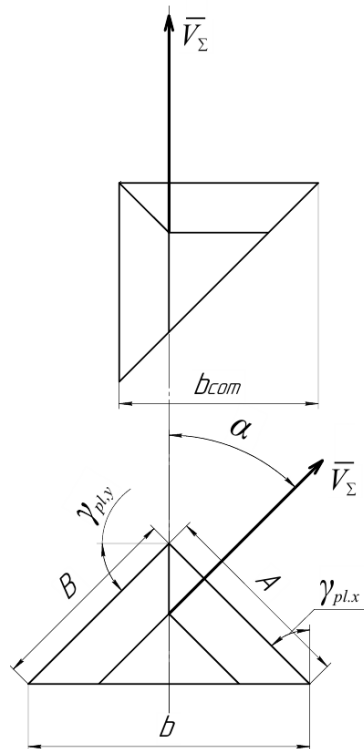


Рисунок 2.11. Параметризація просторово-орієнтованого ножа при

$$\gamma_{pl,y} = \alpha = \gamma_{pl,x}$$

Коли $\gamma_{pl,y} = \alpha = \gamma_{pl,x}$ представлено на (рис. 2.11), то кути повороту в плані будуть мати вигляд:

$$\gamma_{pl.v.1} = \gamma_{pl,y} - \alpha(0^\circ), \quad (2.7)$$

$$\gamma_{pl.v.2} = \gamma_{pl,y} + \alpha(90^\circ). \quad (2.8)$$

Загальна ширина прорізу:

$$b_{com} = b_I = A. \quad (2.9)$$

З'ясовано що такій роботі рухомого просторово орієнтованого ножа, його грань A буде взаємодіяти з ґрунтом як прямий ніж, при цьому грань B , буде паралельною напрямку різання. Ширина прорізи b буде дорівнювати довжині ріжучої кро-
мки, а кут повороту в плані γ_{pl} буде рівний нулю.

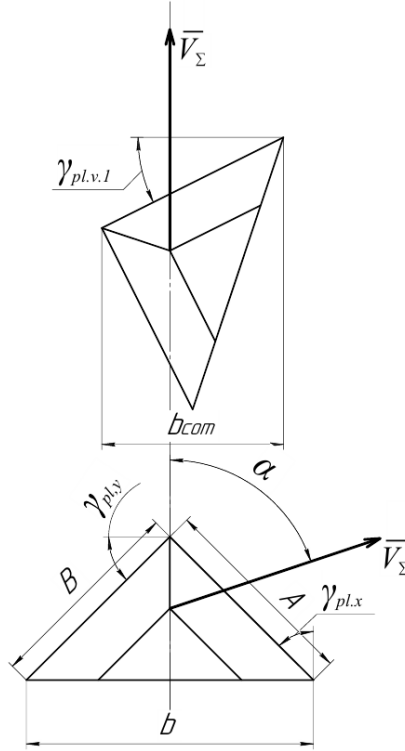


Рисунок 2.12. Параметризація просторово-орієнтованого ножа при

$$\gamma_{pl,y} < \alpha > \gamma_{pl,x}$$

Якщо $\gamma_{pl,y} < \alpha > \gamma_{pl,x}$ представлено на (рис. 2.12), то кути повороту в плані будуть мати вигляд:

$$\gamma_{pl.v.1} = \alpha - \gamma_{pl,y}, \quad (2.10)$$

$$\gamma_{pl.v.2} = \alpha + \gamma_{pl,y} (> 90^\circ). \quad (2.11)$$

Загальна ширина прорізу:

$$b_{com} = b_I = A \cdot \cos(\gamma_{pl.v.1}). \quad (2.12)$$

З'ясовано що такий роботі рухомого просторово орієнтованого ножа, його грані та кромки будуть взаємодіяти з ґрунтом по різному, так як грань B ножа не буде взаємодіяти з ґрунтом коли працює грань A . Та при зміні напрямку руху взаємодія граней змінюється на протилежну. Також змінюються геометричні параметри ширини b та кута повороту в плані γ_{pl} відповідно осі X . Що вплине на загальну силу різання ґрунтового масиву.

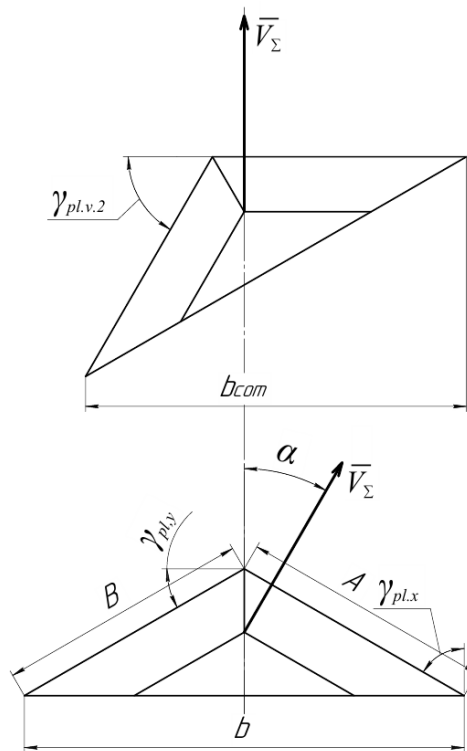


Рисунок 2.13. Параметризація просторово-орієнтованого ножа при $\gamma_{pl.y} = \alpha > \gamma_{pl.x}$

Коли $\gamma_{pl.y} = \alpha > \gamma_{pl.x}$ представлено на (рис. 2.13), то кути повороту в плані будуть мати вигляд:

$$\gamma_{pl.v.1} = \gamma_{pl.y} - \alpha(0^\circ), \quad (2.13)$$

$$\gamma_{pl.v.2} = \gamma_{pl.y} + \alpha. \quad (2.14)$$

Ширина прорізу відносно вектора:

$$b_I = A, \quad (2.15)$$

$$b_{II} = B \cdot \cos(\gamma_{pl.v.2}). \quad (2.16)$$

Загальна ширина прорізу:

$$b_{com} = b_I + b_{II}. \quad (2.17)$$

З'ясовано що такій роботі рухомого просторово орієнтованого ножа, його грані та кромки будуть взаємодіяти з ґрунтом по різному, так грань B ножа буде взаємодіяти з ґрунтом, як косокутний ніж. Тобто буде мати кут повороту в плані γ_{pl} . При цьому грань A , буде працювати як прямий ніж. При зміні циклу, взаємодія граней з робочим середовищем, зміняться на протилежну. Також, змінюються розміри ширини прорізи b . Таке різання буде притаманне, тільки для ножа з даними геометричними характеристиками.

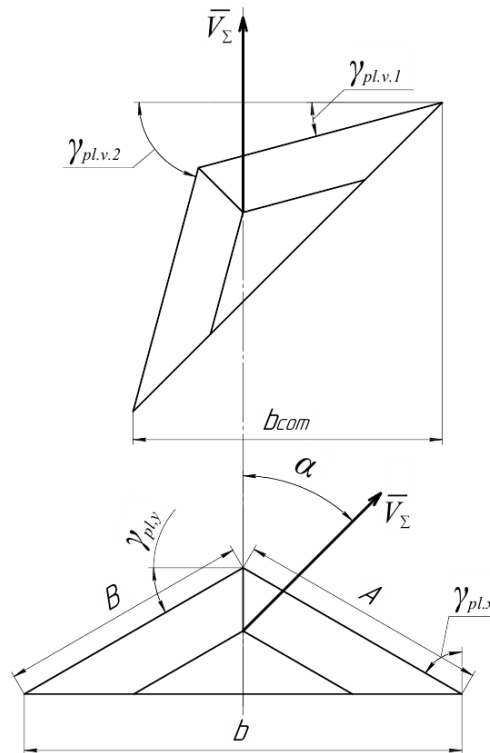


Рисунок 2.14. Параметризація просторово-орієнтованого ножа при

$$\gamma_{pl.y} < \alpha < \gamma_{pl.x}$$

Якщо $\gamma_{pl.y} < \alpha < \gamma_{pl.x}$ представлено на (рис. 2.14), то кути повороту в плані будуть мати вигляд:

$$\gamma_{pl.v.1} = \gamma_{pl.x} - \alpha, \quad (2.18)$$

$$\gamma_{pl.v.2} = \gamma_{pl.y} + \alpha. \quad (2.19)$$

Ширина прорізу відносно вектора:

$$b_I = A \cdot \cos(\gamma_{pl.v.1}), \quad (2.20)$$

$$b_{II} = B \cdot \cos(\gamma_{pl.v.2}). \quad (2.21)$$

Загальна ширина прорізу:

$$b_{com} = b_I + b_{II}. \quad (2.22)$$

З'ясовано що такій роботі рухомого просторово орієнтованого ножа, його грані та кромки будуть взаємодіяти з ґрунтом по різному, так як грань B ножа буде взаємодіяти з ґрунтом, в тому ж напрямку прикладання сили що і грань A . Також, змінюються розміри ширини прорізи b . Коли кут повороту в плані γ_{pl} для грані B буде більший ніж для грані A . Проте вони будуть повернуті відносно осі X . Таке різання буде притаманне, тільки для ножа з даною геометрією, та швидкістю його переміщення.

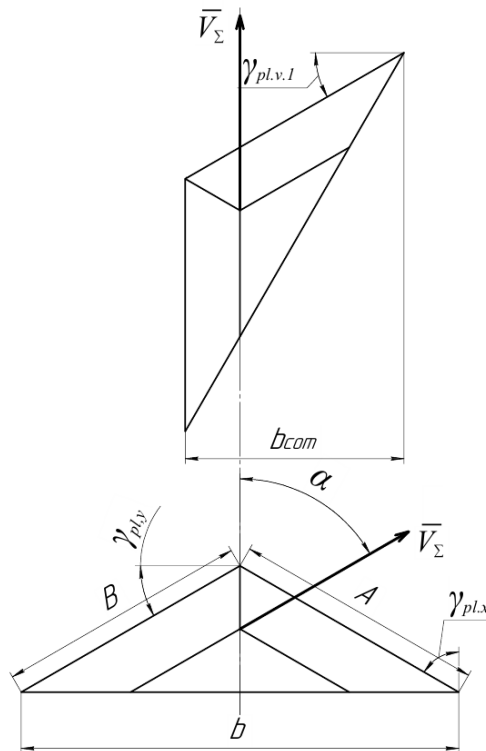


Рисунок 2.15. Параметризація просторово-орієнтованого ножа при

$$\gamma_{pl.y} < \alpha = \gamma_{pl.x}$$

Якщо $\gamma_{pl.y} < \alpha = \gamma_{pl.x}$, як показано на (рис. 2.15), то кути повороту в плані становитимуть:

$$\gamma_{pl.v.1} = \alpha - \gamma_{pl.y}, \quad (2.23)$$

$$\gamma_{pl.v.2} = \alpha + \gamma_{pl.y}(90^\circ). \quad (2.24)$$

Загальна ширина прорізу:

$$b_{com} = b_I = A \cdot \cos(\gamma_{pl.v.1}). \quad (2.25)$$

З'ясовано що такій роботі рухомого просторово орієнтованого ножа, його грані та кромки будуть взаємодіяти з ґрунтом по різному, так грань B ножа не буде взаємодіяти з ґрунтом, при тому коли працює грань A , бо вона паралельна напрямку різання. При зміні циклу, взаємодія граней з робочим середовищем, зміняться на протилежну. Також, змінюються розміри ширини прорізі b , та кут повороту в плані γ_{pl} для грані A , відповідно до осі X .

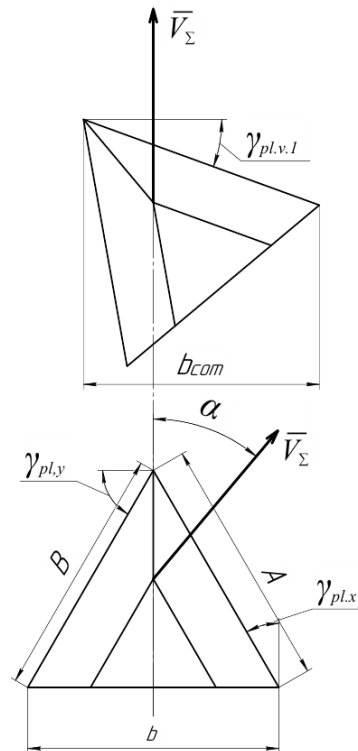


Рисунок 2.16. Параметризація просторово-орієнтованого ножа при

$$\gamma_{pl.y} > \alpha > \gamma_{pl.x}$$

Якщо $\gamma_{pl.y} > \alpha > \gamma_{pl.x}$ представлено на (рис. 2.16), то кути повороту в плані будуть мати вигляд:

$$\gamma_{pl.v.1} = \gamma_{pl.y} - \alpha, \quad (2.26)$$

$$\gamma_{pl.v.2} = \gamma_{pl.y} + \alpha (> 90^\circ). \quad (2.27)$$

Загальна ширина прорізу:

$$b_{com} = b_I = A \cdot \cos(\gamma_{pl.v.1}). \quad (2.28)$$

З'ясовано що такій роботі рухомого просторово орієнтованого ножа, його грані та кромки будуть взаємодіяти з ґрунтом по різному, так як грань B ножа не буде взаємодіяти з ґрунтом коли працює грань A . Та при зміні циклу взаємодія граней змінюється на протилежну. Також змінюються геометричні параметри ширини b та кута повороту в плані γ_{pl} . На відміну від описаних взаємодій раніше, ця буде відбуватись відносно осі Y .

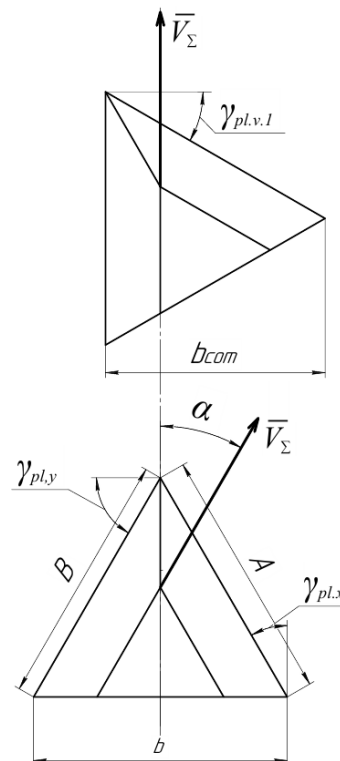


Рисунок 2.17. Параметризація просторово-орієнтованого ножа при

$$\gamma_{pl.y} > \alpha = \gamma_{pl.x}$$

Якщо $\gamma_{pl.y} > \alpha = \gamma_{pl.x}$, як показано на (рис. 2.17), то кути повороту в плані становитимуть:

$$\gamma_{pl.v.1} = \gamma_{pl.y} - \alpha, \quad (2.29)$$

$$\gamma_{pl.v.2} = \gamma_{pl.y} + \alpha(90^\circ). \quad (2.30)$$

Загальна ширина прорізу:

$$b_{com} = b_I = A \cdot \cos(\gamma_{pl.v.1}). \quad (2.31)$$

З'ясовано що такій роботі рухомого просторово орієнтованого ножа, його грані та кромки будуть взаємодіяти з ґрунтом по різному, так грань B ножа не буде взаємодіяти з ґрунтом, при тому коли працює грань A , бо вона паралельна напрямку різання. При зміні циклу, взаємодія граней з робочим середовищем, зміняться на протилежну. Також, змінюються розміри ширини прорізи b , та кут повороту в плані γ_{pl} для грані A , відповідно до осі Y .

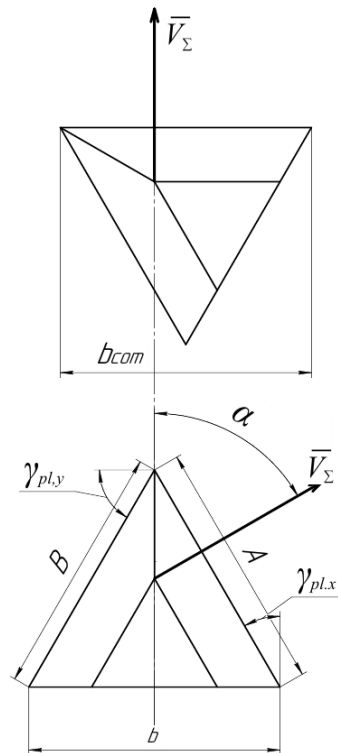


Рисунок 2.18. Параметризація просторово-орієнтованого ножа при

$$\gamma_{pl.y} = \alpha > \gamma_{pl.x}$$

Коли $\gamma_{pl.y} = \alpha > \gamma_{pl.x}$ представлено на (рис. 2.18), то кути повороту в плані будуть мати вигляд:

$$\gamma_{pl.v.1} = \gamma_{pl.y} - \alpha(0^\circ), \quad (2.32)$$

$$\gamma_{pl.v.2} = \gamma_{pl.y} + \alpha(> 90^\circ). \quad (2.33)$$

Загальна ширина прорізу:

$$b_{com} = b_I = A. \quad (2.34)$$

З'ясовано що такій роботі рухомого просторово орієнтованого ножа, його грань A буде взаємодіяти з ґрунтом як прямий ніж, при цьому грань B , взагалі не буде взаємодіяти з ґрунтовым середовищем. Ширина прорізи b буде дорівнювати довжині ріжучої кромки, а кут повороту в плані γ_{pl} буде рівний нулю [55].

2.4. Силевий аналіз при роботі рухомих просторово орієнтованих ножів

Більшість розрахунків ножів землерийної техніки, базуються на припущенні, що параметри взаємодії робочого інструменту, не змінюються при роботі з ґрунтом [56, 57].

Зміна параметрів, за рахунок багатовекторної взаємодії частин робочого органу, вивчена недостатньо. Тому особливо актуальною є розробка методики визначення параметрів і сил різання просторово орієнтованим ножем відвального обладнання.

Основним способом механічного руйнування ґрунтів є різання. Основними геометричними умовами є положення кромки ріжучого клина відносно напрямку різання і поверхні масиву, контур ріжучої кромки, контур і кількість робочих поверхонь ріжучого клина, кількість так званих бічних поверхонь зрізу і так званих блокованих поверхонь зрізу. Ці ознаки використовуються для розрізнення різних типів процесу та створення класифікації типів різання [58, 59, 60].

При роботі землерийної машини з косим зрізом, взаємодія ножа з ґрунтом є просторовою, що проявляється в утворенні трапецієподібного перерізу в несиметричному прорізі [61].

Для кількісної оцінки впливу просторового процесу пропонується розглядати силу P як складову частин, що відповідає характеру опору ґрунту в різних частинах зони зламу перед ножом. Таким чином, сила P косого різання ґрунтів визначається як сума трьох складових P_f – сила подолання опору ґрунту передньою кромкою ножа, P_s – сила подолання опору руйнуванню ґрунту в бічних продовженнях щілини та $P_{s.c}$ – сила подолання опору ґрунту бічними гранями ножа.

Різницю P_f для прямокутного різання, та P_f для косого різання пропонується враховувати коефіцієнтом φ_f , який залежить від співвідношення h/b та кута γ_{pl} повороту ножа в плані.

Сили P_s і $P_{s.c}$ залежать, окрім властивостей ґрунту, лише від товщини різу та кута γ_{pl} повороту ножа в плані. Вплив кута повороту ножа в плані на зміну цих зусиль враховується коефіцієнтами φ_s і $\varphi_{s.c}$ (рис. 2.20 і 2.21).

Співвідношення h/b між товщиною і шириною різу, розмір бічних розширень збільшується пропорційно зі збільшенням товщини різу, а ширина залишається постійною []. Коли товщина різання досягає так званої критичної глибини різання, припиняється ріст бічного розширення щілини і починається інтенсивний ріст ділянок бокового зрізу ґрунту ребрами ножа. Ґрунт перед ножом понад критичну глибину різання вдавлюється в масив з боків ножа і не відділяється від масиву. Тому критична глибина різання відповідає мінімальній витраті електроенергії [62, 63, 64].

Особливістю процесу копання є те, що його потужність і енергетичні показники залежать від кінематичних умов і геометричних параметрів – товщини, ширини і площі зрізу, а також від кутів орієнтації робочого органу в просторі [65].

Також важливою частиною, яка впливає на силу різання, є кут різання який визначають з графіку (рис. 2.19), в залежності від прикладеної сили різання.

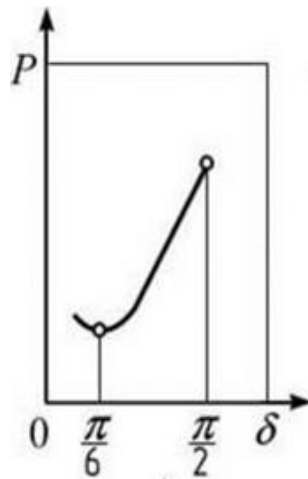


Рисунок 2.19. Графік залежності кута різання δ

Результати дослідів визначенню залежності нормальної сили N сили від кута різання. Показали що, при сталості кута тертя для даного ґрунту нормальну силу можна вважати тригонометричною функцією сили P різання, причому при куті різання $\delta < \pi / 2 - \mu$ гострі ножі зтягуються в масив, а при $\delta > \pi / 2 - \mu$ вони виштовхуються з нього. Сили зтягування зростають у міру зменшення кута різання.

Використовуючи дані, отримані під час розрахунку вектора, прикладаємо до просторово орієнтованого рухомого ножа вектор, що позначає напрямок сили різання, з урахуванням кута α , показника напрямку прикладання сили різання, знаходимо зміну кута γ_{pl} повороту ножа в плані.

Використання двогранного ножа призводить до двох площин кутів повороту $\gamma_{pl.v.1}$ і $\gamma_{pl.v.2}$, що відповідають кожній із кромки, і зміни ширини різання b .

Ці параметри впливають на ширину різання b , тому визначення ширини різання походить від вектора руху та обчислюється за допомогою рівнянь b_I і b_{II} , які наведені нижче, де A та B – довжина кромки ножа [55].

$$b_I = A \cdot \cos(\gamma_{pl.v.1}), \quad (2.35)$$

$$b_{II} = B \cdot \cos(\gamma_{pl.v.2}). \quad (2.36)$$

Критична глибина різання для більшості ґрунтів при нормальних кутах різання леза дорівнює відношенню h/b глибини різання h до ширини леза b у межах від 1 до 3.

Розрахунок проводився за формулою косого різання:

$$P = \varphi(\delta)\varphi_f m_f b h + \varphi_s m_s h^2 + \varphi_{s.c} m_{s.c} h. \quad (2.37)$$

Де b, h – ширина полотна і глибина різання.

m_f – коефіцієнт міцності, що характеризує питомі опори в лобовій частині вирізу (МПа) (табл. 1).

m_s – коефіцієнт міцності, що характеризує питомі опори при бічних розтягненнях (МПа) (табл. 1).

$m_{s.c}$ – коефіцієнт міцності, що характеризує питомі опори по лініях бічного зрізу (кН/м) (табл. 1).

$\varphi(\delta)$ – коефіцієнт, що враховує вплив кута різання δ (при $\delta = 45^\circ$, $\varphi = 1$).

φ_f – коефіцієнт, що враховує вплив кута γ_{pl} повороту ножа в плані, відповідно, сили P_f .

φ_s – коефіцієнт, що враховує вплив кута γ_{pl} повороту ножа в плані, відповідно, сили P_s (рис. 7).

$\varphi_{s.c}$ – коефіцієнт, що враховує вплив кута γ_{pl} повороту ножа в плані, відповідно, сили $P_{s.c}$ (Рис. 8).

Формули, для визначення коефіцієнта φ_f для кожної кромки просторово орієнтованого ножа:

$$\varphi_{f.1} = 1 - 0,07 \frac{h}{b_1} (\cot \delta + \cot 35^\circ) \sin 2\gamma_{pl.v.1}. \quad (2.38)$$

$$\varphi_{f.2} = 1 - 0,07 \frac{h}{b_2} (\cot \delta + \cot 35^\circ) \sin 2\gamma_{pl.v.2}. \quad (2.39)$$

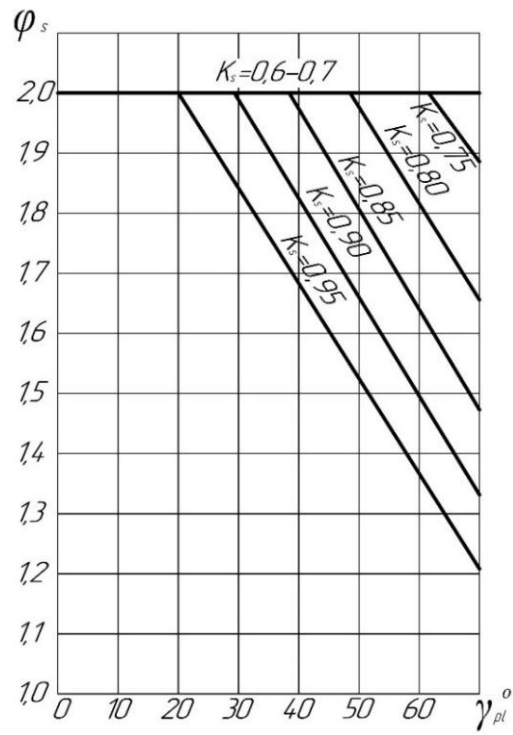


Рисунок 2.20. Графік залежностей коефіцієнта $\varphi_s(\gamma_{pl})$

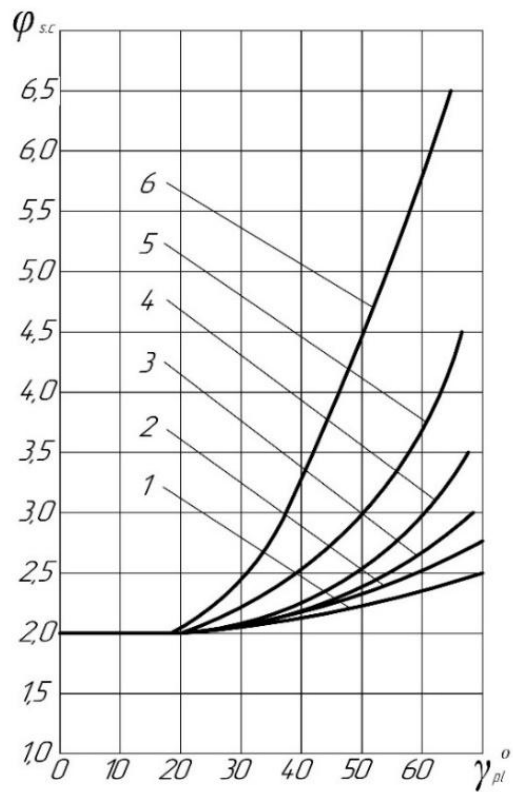


Рисунок 2.21. Графік залежностей коефіцієнта $\varphi_{s,c}(\gamma_{pl})$

Для значень k_s : 1 – 0,6; 2 – 0,7; 3 – 0,75; 4 – 0,8; 5 – 0,85; 6 – 0,9.

Де, k_s це питомий опір ґрунту.

Досліджуючи робочу гіпотезу, знайдено п'ять основних планів переміщення просторово орієнтованого ножа, відповідно кута α від 0° до 90° [66, 68]:

1) Коли кут α дорівнює 0° :

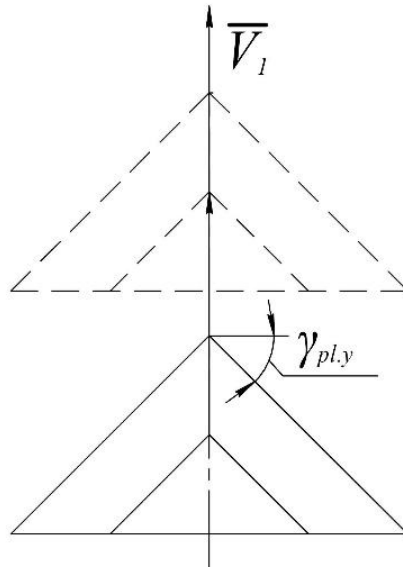


Рисунок 2.22. Траєкторія робочого руху просторово орієнтованого ножа коли кут $\alpha = 0^\circ$

Повна сила різання:

$$P = 2P_{(V_1)}, \quad (2.40)$$

$$P_{(V_1)} = \varphi(\delta)\varphi_f m_f b_1 h + \varphi_s m_s h^2 + \varphi_{s.c} m_{s.c} h, \quad (2.41)$$

Сила різання по нормалі:

$$N = P_{(V_1)} \cdot \left(\frac{\cos \gamma_{pl.v.1} - \tan \mu \sin \delta \sqrt{\cos^2 \gamma_{pl.v.1} + \tan^2 \delta}}{\tan \delta \cos \gamma_{pl.v.1} + \tan \mu \cos \delta \sqrt{\cos^2 \gamma_{pl.v.1} + \tan^2 \delta}} \right), \quad (2.42)$$

$$N_{com} = 2 \cdot N. \quad (2.43)$$

За таких робочих параметрів просторово орієнтованого ножа, ортогональна сила різання збалансована і дорівнює 0.

2) Коли кут α дорівнює 90° :

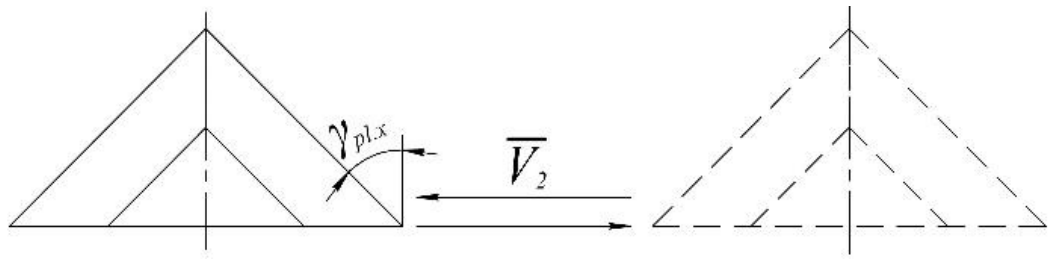


Рисунок 2.23. Траєкторія робочого руху просторово орієнтованого ножа коли кут $\alpha = 90^\circ$

Повна сила різання, для $\bar{V}_2$:

$$P_{(V_2)} = \varphi(\delta)\varphi_f m_f b_1 h + \varphi_s m_s h^2 + \varphi_{s.c} m_{s.c} h. \quad (2.44)$$

Сила різання по нормалі, для $\bar{V}_2$:

$$N = P_{(V_2)} \cdot \left(\frac{\cos \gamma_{pl.v.1} - \tan \mu \sin \delta \sqrt{\cos^2 \gamma_{pl.v.1} + \tan^2 \delta}}{\tan \delta \cos \gamma_{pl.v.1} + \tan \mu \cos \delta \sqrt{\cos^2 \gamma_{pl.v.1} + \tan^2 \delta}} \right). \quad (2.45)$$

Ортогональна сила різання, для $\bar{V}_2$:

$$P_o = P_{(V_2)} \cdot \left(\frac{\tan \delta \sin \gamma_{pl.v.1}}{\tan \delta \cos \gamma_{pl.v.1} + \tan \mu \cos \delta \sqrt{\cos^2 \gamma_{pl.v.1} + \tan^2 \delta}} \right). \quad (2.46)$$

Наступним кроком є побудова циклу руху ножа відповідно до векторів руху $\bar{V}_\Sigma$, при такому складному русі взаємодія ножа з ґрунтом змінюється, оскільки змінюються γ_{pl} і b , замість них з'являється, $\gamma_{pl.v.1}$, $\gamma_{pl.v.2}$, і b_1 , b_2 , які враховуються в рівняннях для визначення сил P , N , P_o .

3) Коли α менше ніж 45° :

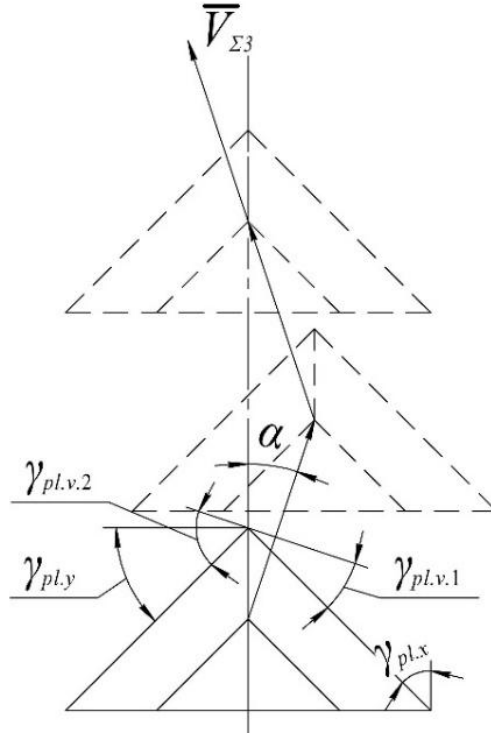


Рисунок 2.24. Траєкторія робочого руху просторово орієнтованого ножа коли кут $\alpha < 45^\circ$

Повна сила різання, для $\bar{V}_{\Sigma 3}$:

$$P_1 = \varphi(\delta)\varphi_{f.1}m_f b_1 h + \varphi_{s.1}m_s h^2 + \varphi_{s.c.1}m_{s.c}h, \quad (2.47)$$

$$P_2 = \varphi(\delta)\varphi_{f.2}m_f b_2 h + \varphi_{s.2}m_s h^2 + \varphi_{s.c.2}m_{s.c}h, \quad (2.48)$$

$$P_{com} = P_1 + P_2. \quad (2.49)$$

Сила різання по нормалі, для $\bar{V}_{\Sigma 3}$:

$$N_1 = P_1 \cdot \left(\frac{\cos \gamma_{pl.v.1} - \tan \mu \sin \delta \sqrt{\cos^2 \gamma_{pl.v.1} + \tan^2 \delta}}{\tan \delta \cos \gamma_{pl.v.1} + \tan \mu \cos \delta \sqrt{\cos^2 \gamma_{pl.v.1} + \tan^2 \delta}} \right), \quad (2.50)$$

$$N_2 = P_2 \cdot \left(\frac{\cos \gamma_{pl.v.2} - \tan \mu \sin \delta \sqrt{\cos^2 \gamma_{pl.v.2} + \tan^2 \delta}}{\tan \delta \cos \gamma_{pl.v.2} + \tan \mu \cos \delta \sqrt{\cos^2 \gamma_{pl.v.2} + \tan^2 \delta}} \right), \quad (2.51)$$

$$N_{com} = N_1 + N_2. \quad (2.52)$$

Ортогональна сила різання, для $\bar{V}_{\Sigma 3}$:

$$P_{o.1} = P_1 \cdot \left(\frac{\tan \delta \sin \gamma_{pl.v.1}}{\tan \delta \cos \gamma_{pl.v.1} + \tan \mu \cos \delta \sqrt{\cos^2 \gamma_{pl.v.1} + \tan^2 \delta}} \right), \quad (2.53)$$

$$P_{o.2} = P_2 \cdot \left(\frac{\tan \delta \sin \gamma_{pl.v.2}}{\tan \delta \cos \gamma_{pl.v.2} + \tan \mu \cos \delta \sqrt{\cos^2 \gamma_{pl.v.1} + \tan^2 \delta}} \right), \quad (2.54)$$

$$P_{o.com} = P_{o.2} - P_{o.1}. \quad (2.55)$$

4) Коли кут α дорівнює 45° :

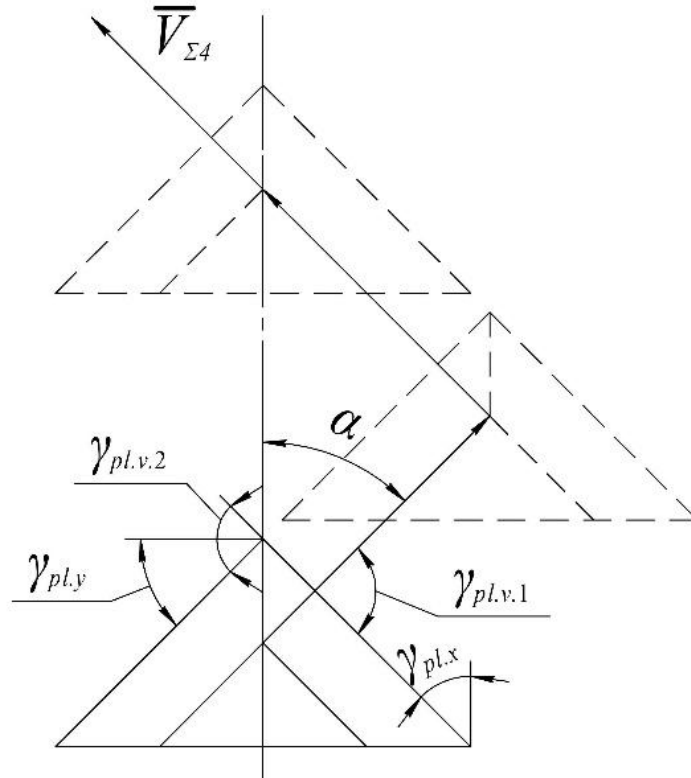


Рисунок 2.25. Траєкторія робочого руху просторово орієнтованого ножа коли кут $\alpha = 45^\circ$

Повна сила різання, для $\bar{V}_{\Sigma 4}$:

$$P = \varphi(\delta) m_f b_1 h + 2 m_s h^2 + 2 m_{s.c} h. \quad (2.56)$$

Сила різання по нормалі, для $\bar{V}_{\Sigma 4}$:

$$P_o = P \cdot \left(\frac{\tan \delta \sin \gamma_{pl.v.1}}{\tan \delta \cos \gamma_{pl.v.1} + \tan \mu \cos \delta \sqrt{\cos^2 \gamma_{pl.v.1} + \tan^2 \delta}} \right). \quad (2.60)$$

2.5. Результати розрахунку сили різання просторово орієнтованими рухомих ножів відвального обладнання

Згідно, до графіків залежностей, наведених вище було виведено коефіцієнти φ_s та $\varphi_{s.c.}$ які залежать від кута повороту ножа в плані. Через його складну взаємодію з ґрунтовим середовищем, потрібно було зробити розподілення відносно кожної з робочих граней, у відповідності до відхилення повної сили різання яка позначена кутом α . Визначення коефіцієнта φ_s , що враховує вплив кута γ_{pl} повороту ножа в плані, відповідно, сили P_s наведене в таблиці 2.3., а визначення коефіцієнта $\varphi_{s.c.}$, що враховує вплив кута γ_{pl} повороту ножа в плані, відповідно, сили $P_{s.c.}$ наведене в таблиці 2.4.

Таблиця 2.3. Коефіцієнт φ_s

α	$\gamma_{pl.v.1}$	$\gamma_{pl.v.2}$	b_1	b_2	k_s					
					0,8		0,85		0,9	
			cm		$\varphi_{s.1}$	$\varphi_{s.2}$	$\varphi_{s.1}$	$\varphi_{s.2}$	$\varphi_{s.1}$	$\varphi_{s.2}$
0°	45°	45°	10,5	10,5	2,0	2,0	1,88	1,88	1,75	1,75
10°	35°	55°	12.3	8,6	2,0	1,89	2,0	1,72	1,89	1,57
20°	25°	65°	13.6	6,4	2,0	1,73	2,0	1,55	2,0	1,41
30°	15°	75°	14.5	3,5	2,0	1,58	2,0	1,39	2,0	1,25
40°	5°	85°	15	1,5	2,0	1,41	2,0	1,22	2,0	0,9
45°	0°	90°	15	-	2,0	-	2,0	-	2,0	-
50°	5°	95°	15	-	2,0	-	2,0	-	2,0	-
60°	15°	105°	14,5	-	2,0	-	2,0	-	2,0	-
70°	25°	115°	13,6	-	2,0	-	2,0	-	2,0	-
80°	35°	125°	12,3	-	2,0	-	2,0	-	1,89	-
90°	45°	135°	10,5	-	2,0	-	1,88	-	1,75	-

Таблиця 2.4. Коефіцієнт $\varphi_{s.c.}$

α	$\gamma_{pl.v.1}$	$\gamma_{pl.v.2}$	b_1	b_2	k_s					
					0,8		0,85		0,9	
			cm		$\varphi_{s.c.1}$	$\varphi_{s.c.2}$	$\varphi_{s.c.1}$	$\varphi_{s.c.2}$	$\varphi_{s.c.1}$	$\varphi_{s.c.2}$
0°	45°	45°	10,5	10,5	2,29	2,29	2,66	2,66	3,64	3,64
10°	35°	55°	12,3	8,6	2,1	2,7	2,3	3,41	2,8	4,83
20°	25°	65°	13,6	6,4	2,05	3,3	2,1	4,27	2,2	6,19
30°	15°	75°	14,5	3,5	2,0	3,96	2,0	5,2	2,0	7,67
40°	5°	85°	15	1,5	2,0	4,65	2,0	6,17	2,0	9,21
45°	0°	90°	15	-	2,0	-	2,0	-	2,0	-
50°	5°	95°	15	-	2,0	-	2,0	-	2,0	-
60°	15°	105°	14,5	-	2,0	-	2,0	-	2,0	-
70°	25°	115°	13,6	-	2,05	-	2,1	-	2,2	-
80°	35°	125°	12,3	-	2,1	-	2,3	-	2,8	-
90°	45°	135°	10,5	-	2,29	-	2,66	-	3,64	-

Використовуючи формули для визначення коефіцієнта φ_f . Знаходимо коефіцієнт, для кожної кромки просторово орієнтованого ножа, так як від має просторову взаємодію з ґрунтом при різних кутах α . Результати розрахунку занесені до таблиці 2.5.

Таблиця 2.5. Коефіцієнт φ_f

α	$\gamma_{pl.v.1}$	$\gamma_{pl.v.2}$	b_1	b_2	$h, \text{ cm}$					
					10		20		35	
			cm		$\varphi_{f.1}$	$\varphi_{f.2}$	$\varphi_{f.1}$	$\varphi_{f.2}$	$\varphi_{f.1}$	$\varphi_{f.2}$
0°	45°	45°	10,5	10,5	0,83	0,83	0,66	0,66	0,4	0,4
10°	35°	55°	12.3	8,6	0,87	0,81	0,72	0,61	0,52	0,31
20°	25°	65°	13.6	6,4	0,9	0,79	0,79	0,57	0,64	0,24
30°	15°	75°	14.5	3,5	0,94	0,75	0,87	0,49	0,78	0,1
40°	5°	85°	15	1,5	0,98	0,8	0,95	0,58	0,92	0,27
45°	0°	90°	15	-	1	-	1	-	1	-
50°	5°	95°	15	-	0,98	-	0,95	-	0,92	-
60°	15°	105°	14,5	-	0,94	-	0,87	-	0,78	-
70°	25°	115°	13,6	-	0,9	-	0,79	-	0,64	-
80°	35°	125°	12,3	-	0,87	-	0,72	-	0,52	-
90°	45°	135°	10,5	-	0,83	-	0,66	-	0,4	-

Визначивши параметри взаємодії ножа з робочим середовищем, зміну ширини різання b_{com} і зміну кута повороту $\gamma_{pl.v.1}$, можна розрахувати повну силу різання.

Розрахунок повної сили різання:

$$P = \varphi(\delta)\varphi_f m_f b_1 h + \varphi_s m_s h^2 + \varphi_{s.c} m_{s.c} h. \quad (2.61)$$

Сила різання по нормалі:

$$N = P \cdot \left(\frac{\cos \gamma_{pl.v.1} - \tan \mu \sin \delta \sqrt{\cos^2 \gamma_{pl.v.1} + \tan^2 \delta}}{\tan \delta \cos \gamma_{pl.v.1} + \tan \mu \cos \delta \sqrt{\cos^2 \gamma_{pl.v.1} + \tan^2 \delta}} \right). \quad (2.62)$$

Ортогональна сила різання:

$$P_o = P \cdot \left(\frac{\tan \delta \sin \gamma_{pl.v.1}}{\tan \delta \cos \gamma_{pl.v.1} + \tan \mu \cos \delta \sqrt{\cos^2 \gamma_{pl.v.1} + \tan^2 \delta}} \right). \quad (2.63)$$

Де b буде дорівнювати b_{com} , h - ширина ножа і глибина (товщина) різку; m_f - коефіцієнт міцності, що характеризує питомі опори в лобовій частині надрізу (МПа); m_s - коефіцієнт міцності, що характеризує питомі опори в бічних продовженнях (МПа); $m_{s.c}$ - коефіцієнт міцності, що характеризує питомий опір по лініях бічного перерізу (кН/м); $\varphi(\delta)$ - коефіцієнт, що враховує вплив кута різання δ ; φ_f - коефіцієнт, що враховує вплив кута $\gamma_{пл.в.1}$ повороту леза в площині, відповідно до сили P_f ; φ_s - коефіцієнт, що враховує вплив кута $\gamma_{пл.в.1}$ повороту леза в площині, відповідно до сили P_s ; $\varphi_{s.c}$ - коефіцієнт, що враховує вплив кута $\gamma_{пл.в.1}$ повороту леза в площині, відповідно до сили $P_{s.c}$; μ - кут тертя ґрунту по сталі.

Проведено розрахунок для суглинку, мергелистої глини та аргіліту. Визначено три основні сили різання, а саме: повна сила різання P , нормальна сила різання N , та ортогональна сила різання P_o , результати розрахунку представлені у вигляді таблиці 2.6 та графіків на (рис. 2.27; рис. 2.28; рис. 2.29), відповідно до глибин різання [66]. Аналогічні розрахунки були проведені для мергелистої глини та аргіліту. Отримані дані наведені у додатку Б.

Таблиця 2.6. Сила різання суглинка на глибині 10, 20, 35 см

α	Суглинок								
	h , см								
	10			20			35		
	P , кН	N , кН	P_o , кН	P , кН	N , кН	P_o , кН	P , кН	N , кН	P_o , кН
0°	3,86	1,66	0,00	7,62	3,28	0,00	13,04	5,62	0,00
10°	3,94	1,67	0,59	7,79	3,30	1,12	13,52	5,74	1,75
20°	3,96	1,58	1,28	7,97	3,18	2,51	14,20	5,70	4,22
30°	3,90	1,36	2,03	8,11	2,83	4,20	15,10	5,30	7,66
40°	3,96	1,40	3,63	8,53	2,99	7,91	16,65	5,81	15,62
45°	2,79	1,42	0,00	6,11	3,11	0,00	12,05	6,14	0,00
50°	2,75	1,40	0,18	5,88	2,99	0,39	11,42	5,81	0,75
60°	2,59	1,30	0,52	5,39	2,71	1,09	10,12	5,09	2,04
70°	2,39	1,17	0,83	4,86	2,38	1,69	8,80	4,31	3,06
80°	2,19	1,03	1,13	4,35	2,04	2,24	7,69	3,60	3,95
90°	1,93	0,83	1,38	3,81	1,64	2,73	6,52	2,81	4,66

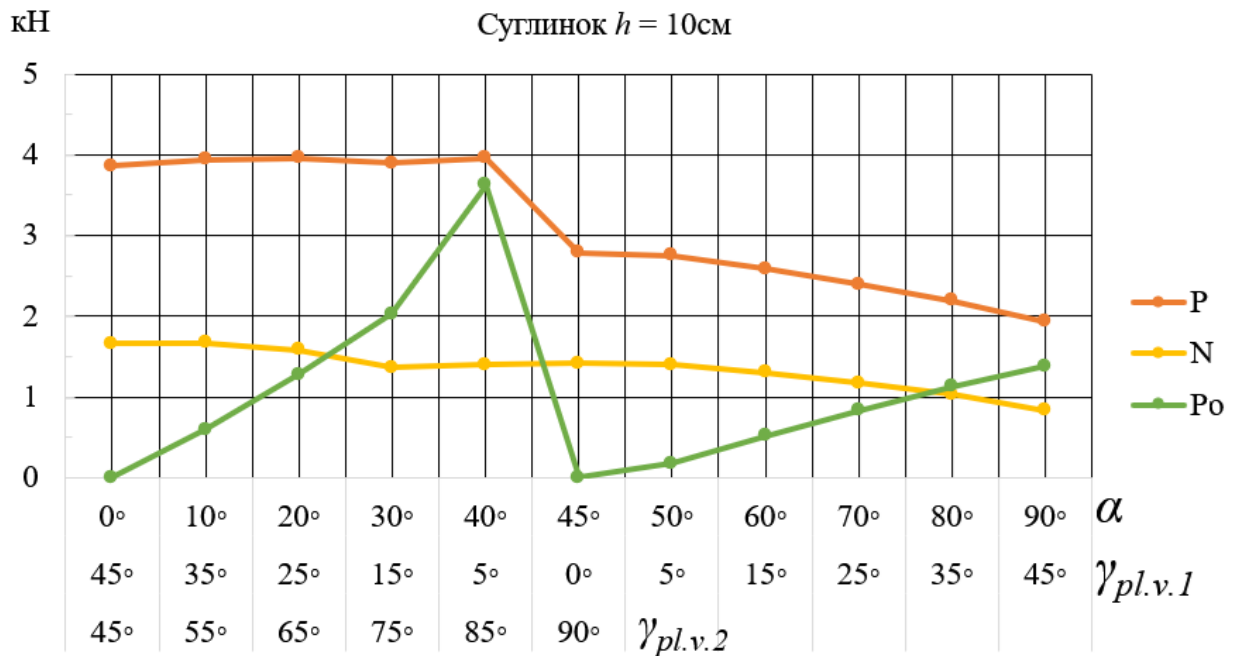


Рисунок 2.27. Графік зусиль різання суглинка на робочій глибині різання 10 см

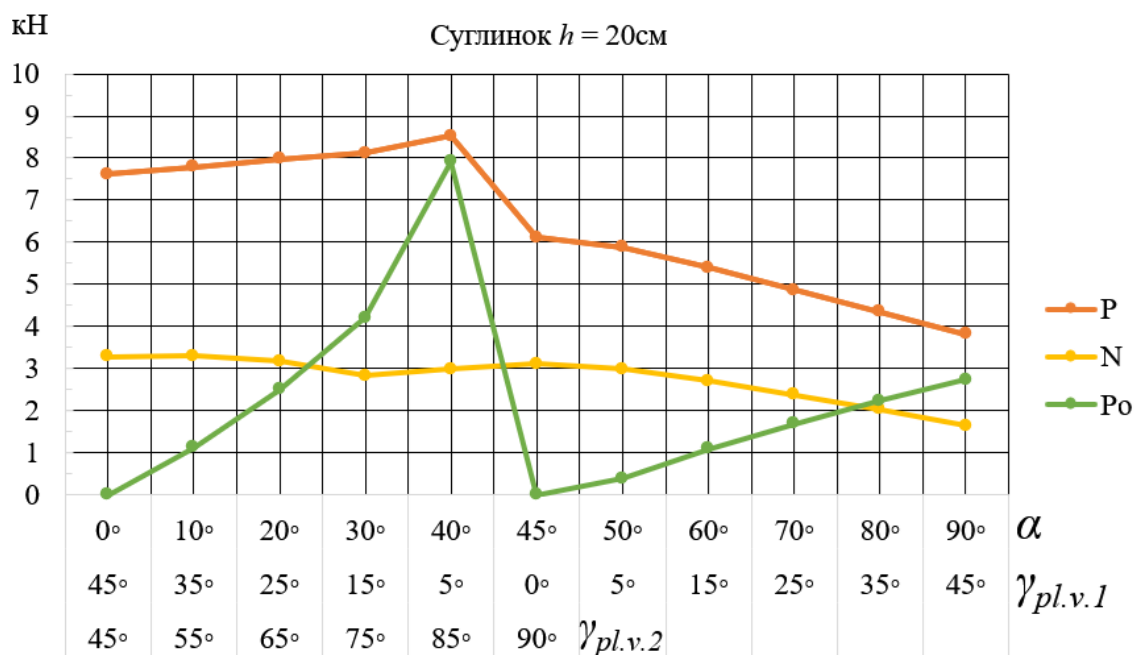


Рисунок 2.28. Графік сил різання суглинок на докритичній глибині різання 20 см

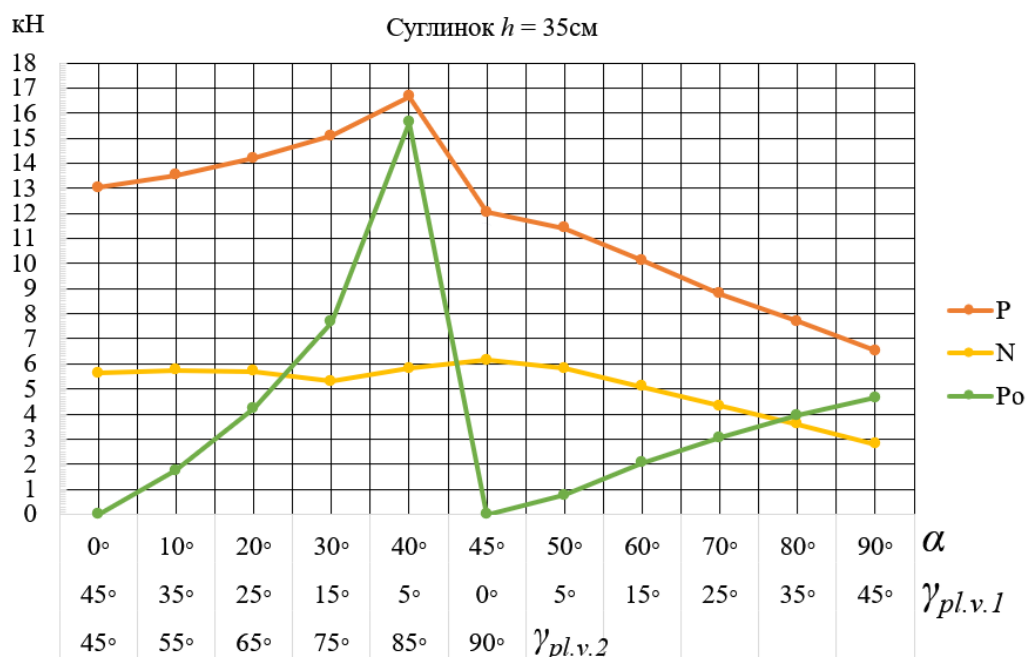


Рисунок 2.29. Графік сил різання суглинок на критичній глибині різання 35 см

Висновки по розділу 2

1. Для розуміння робочого середовища з яким найчастіше буде працювати бульдозер, було вивчено геологічну карту, карту ґрунтів та геологічну карту України за допомогою яких, було визначено найпоширеніші ґрунти. Далі для обраних ґрунтів були з'ясовані фізико механічні характеристики.

2. Було розроблено робочу гіпотезу, коли просторово орієнтований ніж рухається перпендикулярно до руху робочої машини, і в залежності від співвідношення швидкостей змінюється його взаємодія з робочим середовищем. На основі співвідношення швидкостей бульдозера і просторово орієнтованого ножа створюється векторне зображення сил різання і загальний вектор напрямку сили різання, який має відхилення від осі руху бульдозера на кут α .

3. Прикладаючи отримані вектори до рухомого просторово орієнтованого ножа, знайдено дев'ять основних моделей взаємодії з ґрунтом. Відповідно кутів повороту в плані та створено методику їх розрахунку. За допомогою методу виявлено, що відхилення на кут α впливатиме на геометричну взаємодію ножа з ґрунтом, а саме на зміну кутів повороту в плані $\gamma_{pl.v.1}$ та $\gamma_{pl.v.2}$, а також на загальну ширину b_{com} .

4. Знайдено п'ять планів переміщення, рухомого просторово орієнтованого ножа, охоплюючи його весь робочий діапазон, який залежить від кута α . Створена математична модель розрахунку сили різання просторово орієнтованого ножа, залежно від відхилень на кут α , відпо

5. відно до планів переміщень. Для таких ґрунтів, як суглинок, мергельна глина та аргіліт, із співвідношенням h/b від 0,4 до 3,5, що відповідає критеріям різання на критичних глибинах. Знайдено коефіцієнти впливу кута повороту в плані φ_f , φ_s , $\varphi_{s.c}$. Розрахунки представлені у вигляді табличних даних нижче і побудовано графічне зображення сил різання P , N , P_o просторово орієнтованим ножом відвалу. Було встановлено, що при зміні співвідношення швидкостей змінюється кут γ_{pl} повороту ножа в плані, і це відповідно впливає на силу різання P , яка зменшується зі збільшенням α ; нормальну силу N , яка зменшується зі збільшенням α ; та ортогональну силу різання P_o , яка збільшується зі збільшенням α .

Основні наукові результати по даному розділу опубліковані у працях [51, 52, 55, 66, 68]

РОЗДІЛ 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ СИЛ РІЗАННЯ ГРУНТОВОГО СЕРЕДОВИЩА РУХОМИМИ ПРОСТОРОВО ОРІЄНТОВАНИМИ НОЖАМИ

У третьому розділі описано програму та об'єкт проведення експериментальних досліджень. Експериментальні дослідження проводилися з метою перевірки адекватності отриманих аналітичних даних. У експериментальному дослідженні, для дотримання умов подібності процесів, що відбуваються, при взаємодії фізичної моделі оригінального робочого органу, з навколишнім середовищем, необхідно дотримуватися рівності, критеріїв геометричної та динамічної подібності. Виражено параметри натурного процесу через параметри фізичної моделі та коефіцієнти подібності.

Для проведення експериментальних досліджень процесу різання робочого середовища просторово орієнтованими відвалами ножового обладнання було вдосконалено динамометричний стенд для реєстрації силового навантаження авторської конструкції КНУБА, що дозволило провести повноцінні експериментальні дослідження з урахуванням усіх існуючих факторів взаємодії робочого середовища та робочого органу під час різання. Запропоновано використання ґрунтів III, IV та V категорій як робочого середовища.

За допомогою CAD систем, було створено 3D модель та випробувального стенду, для реєстрації сил різання, з рухомим просторово орієнтованим ножом, при цьому симулювати різні види роботи, навантажень та частоти власних коливань.

Вирішити відомі недоліки випробувального стенду та удосконалити його конструкцію. Відповідно до побудованої 3D моделі, відтворити справжню модель пристрою поздовжньо-поступального переміщення, та самого рухомого просторово орієнтованого ножа.

Підібрано та модернізовано вимірювально-реєструюче обладнання, та створено методику проведення експериментальних досліджень.

Проведені експериментальні дослідження в повній мірі підтверджують адекватність теоретичних розрахунків, а порівняння теоретичних та експериментальних

результатів визначення сили різання показало їх достатню збіжність і, відповідно, правомірність використання аналітичних виразів при розрахунку силових параметрів машин з просторово орієнтованими ножами відвального обладнання.

Максимальне значення похибки визначення сили різання теоретичним та експериментальним шляхом на лабораторному стенді реєстрації сил різання просторово орієнтованими ножами відвального обладнання становить $\Delta_{\delta}=10,06\%$.

3.1 Програма та об'єкт експериментальних досліджень

Експериментальні дослідження, містили натурні лабораторні дослідження, для виявлення закономірностей різання ґрунтів, рухомими просторово орієнтованими ножами.

Методика проведення досліджень будувалась таким чином, щоб виявити вплив різних параметрів, на складові сили різання ґрунтів рухомими просторово орієнтованими ножами.

Експериментальні дослідження на лабораторному стенді дозволили уточнити дані якісного та кількісного аналізу рухомих просторово орієнтованих ножів, на яких забезпечується контрольована швидкість подачі робочого органа в ґрунтове середовище, робоче переміщення просторово орієнтованих ножів характеризується рядом особливостей (див. розділ 2), що потребує відповідного контролювання та корегування.

Об'єктом дослідження є різальні процеси, взаємодії рухомих просторово орієнтованих ножів та ґрунтового масиву.

Експериментальні дослідження проводилися, в лабораторії будівельної техніки, кафедри будівельних машин, на динамометричному стенді для реєстрації силового навантаження, при різанні ґрунтів рухомими просторово орієнтованими ножами, авторської конструкції КНУБА [69, 70].

3.2. Визначення коефіцієнтів подібності.

Для експериментальних досліджень, як правило, використовуються повномасштабні об'єкти досліджень та їхні моделі [71]. У повномасштабному експерименті, засоби експериментального дослідження взаємодіють безпосередньо з об'єктом дослідження, а в модельному експерименті – з його модельованим прототипом.

При проведенні модельних експериментальних досліджень, модель виступає як засіб експериментального дослідження, так і безпосередній об'єкт дослідження. [72].

У наш час, створення реального робочого органу для експериментальних досліджень, вимагало б значної кількості часу і грошей. З огляду на це, завдання полягає, у створенні фізичної моделі цього робочого органу, та проведенні на ній повноцінних експериментальних досліджень.

Як критерії подібності, для побудови фізичної моделі (рис. 1), використовуються безрозмірні комплекси, які є відношенням відповідних складових диференціальних рівнянь, реального об'єкта та моделі [73, 74].

Методологія моделювання робочих процесів руйнування ґрунту, базується на теорії подібності.

Умови фізичного моделювання робочого процесу руйнування ґрунту передбачають, що:

- визначальні критерії подібності, процесу руйнування ґрунту для моделі та оригіналу, мають бути однаковими;
- фізичні параметри системи диференціальних рівнянь, що описують робочий процес, складених для моделі та оригіналу, мають бути пропорційними;
- процес взаємодії робочого інструменту з навколишнім середовищем, у моделі та оригіналі, має належати до одного класу явищ і описуватися однією і тією ж системою диференціальних рівнянь;
- модель та оригінал робочого інструменту, та системи.

Взаємодія між, рухомим просторово орієнтованим ножом і робочим середовищем, описується рівнянням:

$$P = \varphi(\delta)\varphi_f m_f b h + \varphi_s m_s h^2 + \varphi_{s.c} m_{s.c} h, \quad (3.1)$$

Для дотримання умов подібності процесів, що відбуваються, при взаємодії фізичної моделі оригінального робочого органу, з навколишнім середовищем, необхідно дотримуватися рівності, критеріїв геометричної та динамічної подібності. Виразимо параметри натурного процесу через параметри фізичної моделі та коефіцієнти подібності:

$$\begin{aligned} P_N &= \nu_P \cdot P_M, & m_{f.N} &= \nu_m \cdot m_{f.M}, & m_{s.N} &= \nu_{m_s} \cdot m_{s.M}, \\ m_{s.c.N} &= \nu_{m_{s.c}} \cdot m_{s.c.M}, & b_N &= \nu_b \cdot b_M, & h_N &= \nu_h \cdot h_M \end{aligned} \quad (3.2)$$

Де P_N , $m_{f.N}$, $m_{s.N}$, $m_{s.c.N}$, b_N , h_N – параметри натуральної моделі; P_M , $m_{f.M}$, $m_{s.M}$, $m_{s.c.M}$, b_M , h_M – параметри фізичної моделі, ν_P , ν_m , ν_{m_s} , $\nu_{m_{s.c}}$, ν_b , ν_h – відповідні коефіцієнти подібності.

Тоді ми можемо записати рівняння, аналогічні рівнянню (3), для натурного процесу та його моделі, які мають такий вигляд:

$$P_N = \varphi(\delta)\varphi_f m_{f.N} b_N h_N + \varphi_s m_{s.N} h_N^2 + \varphi_{s.c} m_{s.c.N} h_N, \quad (3.3)$$

$$P_M = \varphi(\delta)\varphi_f m_{f.M} b_M h_M + \varphi_s m_{s.M} h_M^2 + \varphi_{s.c} m_{s.c.M} h_M. \quad (3.4)$$

З огляду на подібність моделі та натурного процесу, ми ділимо відповідні члени рівнянь (3.3) і (3.4) між собою і записуємо наступні співвідношення:

$$\frac{P_N}{P_M} = \frac{\varphi(\delta)\varphi_f m_{f.N} b_N h_N}{\varphi(\delta)\varphi_f m_{f.M} b_M h_M} = \frac{\varphi_s m_{s.N} h_N^2}{\varphi_s m_{s.M} h_M^2} = \frac{\varphi_{s.c} m_{s.c.N} h_N}{\varphi_{s.c} m_{s.c.M} h_M}, \quad (3.5)$$

Використовуючи залежності (3.2) для цих співвідношень, ми отримуємо:

$$\begin{aligned} \frac{\nu_P \cdot P_M}{P_M} &= \frac{\varphi(\delta) \cdot \varphi_f \cdot \nu_m \cdot m_{f.M} \cdot \nu_b \cdot b_M \cdot \nu_h \cdot h_M}{\varphi(\delta) \cdot \varphi_f \cdot m_{f.M} \cdot b_M \cdot h_M} = \frac{\varphi_s \cdot \nu_{m_s} \cdot m_{s.M} \cdot \nu_h^2 \cdot h_M^2}{\varphi_s \cdot m_{s.M} \cdot h_M^2} = \\ &= \frac{\varphi_{s.c} \cdot \nu_{m_{s.c}} \cdot m_{s.c.M} \cdot \nu_h \cdot h_M}{\varphi_{s.c} \cdot m_{s.c.M} \cdot h_M} \end{aligned} \quad (3.6)$$

Відповідно до теореми подібності, ми зводимо вираз (3.6), що призводить до такого співвідношення між коефіцієнтами подібності:

$$v_p = v_m \cdot v_b \cdot v_h = v_{m_s} \cdot v_h^2 = v_{m_{s.c}} \cdot v_h, \quad (3.7)$$

Розділивши всі частини рівняння (3.7) на, ми отримаємо систему рівнянь:

$$\frac{v_p}{v_p} = 1; \frac{v_m \cdot v_b \cdot v_h}{v_p} = 1; \frac{v_{m_s} \cdot v_h^2}{v_p} = 1; \frac{v_{m_{s.c}} \cdot v_h}{v_p} = 1; \quad (3.8)$$

які пов'язують шість невідомих величин. Усі значення взяті конструктивно, виходячи з фізичних властивостей ґрунту (Таблиця 1) та моделі.

На основі теорії подібності були визначені коефіцієнти подібності, перелічені в (Таблиця 2), які використовувалися для розрахунку геометричних і кінематичних параметрів лабораторних експериментів. Це дозволило спроектувати та виготовити лабораторне обладнання: стенд і просторово орієнтований експериментальний рухомий просторово орієнтований ніж [75].

Таблиця 3.1. Параметри дослідницького обладнання

	Категорії ґрунтів		
	3	4	5
$v_m = \frac{m_{f.N}}{m_{f.M}}$	0,223	0,556	1,067
$v_{m.s} = \frac{m_{s.N}}{m_{s.M}}$	0,201	0,5	1,168
$v_{m.s.c} = \frac{m_{s.c.N}}{m_{s.c.M}}$	0,23	0,569	1,086
$v_h = \sqrt[3]{\frac{v_{m.s.c}}{v_{m.s}}}$	0,37	0,512	0,82
$v_b = \frac{v_{m.f} \cdot v_h}{v_p}$	0,45	0,504	0,77
$v_p = v_{m.s} \cdot v_h^2$	0,22	0,544	1,098

На основі отриманих коефіцієнтів подібності, була створена та адаптована модель рухомого просторово орієнтованого ножа, а також удосконалено випробувальний стенд.

3.3. Опис та створення експериментальної установки.

Для нашого дослідження найбільш наближеним аналогом по технічній суті є стенд реєстрації зусиль різання (деклараційний патент України на корисну модель № 13846, кл. G 01 L 5/16, 2006), який прийнятий за прототип і складається з рами, різцетримача, вертикальних і горизонтальних тяг, з тензочутливими елементами, виготовленими у вигляді балочок, які з'єднані з реєструючою апаратурою [76, 81].

Особливістю даного стенду є використання в ньому механізму горизонтального переміщення візка з різцетримачем через передачу гвинт-гайка та клинопасову передачу від електродвигуна, при цьому є можливість вимірювати сили різання.

Недоліком даного стенда, є неможливість ортогонального переміщення, та нерегульованість швидкості горизонтального переміщення робочого органу, закріпленого на візку [77,78]

Тому основною задачею, є удосконалення конструкції динамометричного стенду реєстрації силового навантаження, при роботі рухомого просторово орієнтованого ножа, регулювання швидкості горизонтального, та створення ортогонального переміщення робочого органу.

Поставлена задача вирішується тим, що для забезпечення різання ґрунтів, рухомими просторово орієнтованими ножами, в утримувач перпендикулярно до осі руху візка зафіксовано передачу гвинт гайка, з черв'ячною передачею та власним електродвигуном і частотним перетворювачем «Suswe» (рис. 3.1. б) [79], також привідний електродвигун стенда, підключений через частотний перетворювач «Frecon» (рис.3.2. а) [80], який дозволяє змінювати частоту струму, що в свою чергу приводить до зміни частоти обертання валу електродвигуна та швидкості горизонтального переміщення візка з робочим органом в зону різання. Схеми підключень інверторів наведені в додатку В.



б

а

Рисунок 3.1. – Частотні перетворювачі

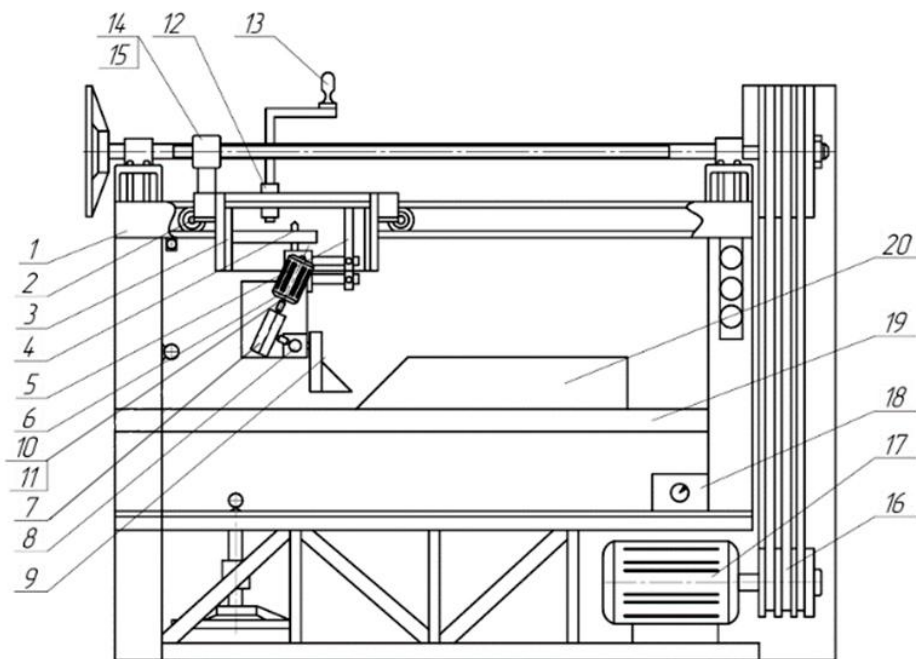


Рисунок 3.2. Схема удосконаленого випробувального стенду

На рисунку 3.2 наведено, удосконалений динамометричний стенд реєстрації силового навантаження (вигляд з боку), який складається зі станини 1, на якій на направляючих балках за допомогою роликів 2, встановлено візок 3, до нього через тензометричні балки 4 і 5 закріплено утримувач 6, в якому через провущини вмонтовано передачу гвинт гайка 8, для переміщення рухомого просторово орієнтованого ножа 9, яке відбувається за допомогою електродвигуна 10, через черв'ячну пере-

дачу 7, в свою чергу електродвигун контролюється частотним перетворювачем 11. Візок 3 оснащений механізмом підйому та опускання 12, з рукояткою 13. Можливість горизонтального переміщення візка 3, здійснена за допомогою передачі гвинт-гайка 14-15, клинопасової передачі 16, та електродвигуна 17, підключеного через частотний перетворювач 18. На монтажній поверхні 19, закріплюється бункер з дослідним матеріалом 20.

Процес дослідження на динамометричному стенді, буде відбуватись наступним чином.

Бункер з дослідним матеріалом 20, жорстко закріплюється на монтажній поверхні 19. Задавши частотним перетворювачем 18, відповідну частоту струму електродвигуна 17, встановлюється необхідна швидкість горизонтального переміщення візка 3, з механізмом переміщення рухомого просторово орієнтованого ножа, ортогональне переміщення якого відбувається, коли задається частотним перетворювачем 11, відповідна частота струму електродвигуна 10.

Таким чином, внесені зміни до конструкції динамометричного стенду реєстрації силового навантаження, дозволяють здійснювати вимірювання зусилля різання ґрунтів, рухомими просторово орієнтованими ножами, та регулювати швидкість горизонтального та ортогонального переміщення робочого органу, закріпленого на візку.

На рисунку 3.3, за допомогою CAD систем, була створена 3D модель випробувального стенда, для різання ґрунтів, з реальними геометричними розмірами, та характеристиками матеріалів [82].

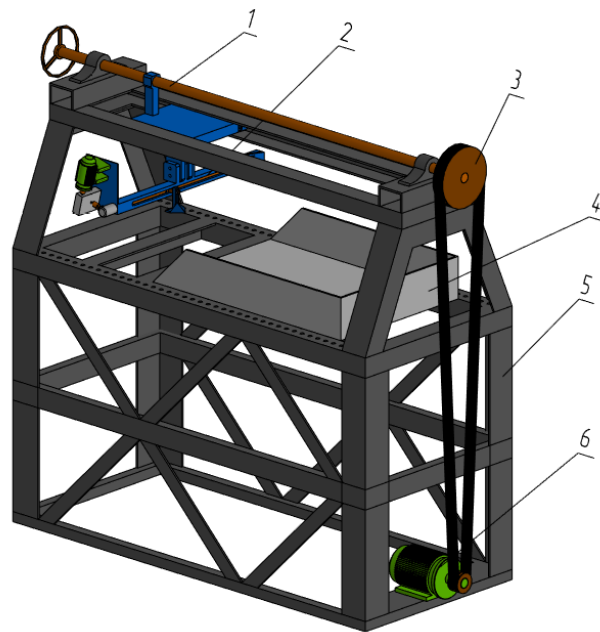


Рисунок 3.3. Випробувальний стенд

Конструкція 3D моделі, відповідала конструкції справжнього стенду, та складалась, із: 1 – передачі гвинт-гайка подачі робочого органа; 2 – привід переміщення рухомого просторово орієнтованого ножа; 3 – клинопасова передача двигуна подачі (передаточне число $u = 2,5$); 4 – бункер для дослідного матеріалу; 5 – рама; 6 – стендовий електродвигун ($P = 2,5$ кВт, $n = 980$ об/хв).

На рисунку 3.4, зображено привід позовжньо – поступального руху, для рухомого просторово орієнтованого ножа [83]

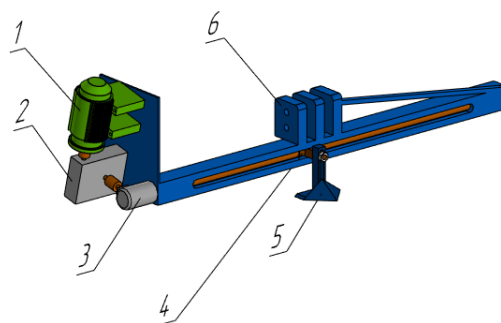


Рисунок 3.4. Привід рухомого просторово орієнтованого ножа

Він закріплюється на стенді через провухини 6. Переміщення просторово орієнтованого ножа 5, в свою чергу буде здійснюватися двигуном ($P = 1,1$ кВт, $n = 3000$

об/хв) робочого органу 1, через черв'ячну передачу 2 з передаточним числом $u = 8$, до конічної передачі 3 з передаточним числом $u = 2$, та до передачі гвинт-гайка 4. Двигуни будуть контролюватись окремими частотними перетворювачами що забезпечити відповідність до швидкісних співвідношень робочої гіпотези.

Сам робочий орган через провущини прикріплюється до рухомого візка випробувального стенду який забезпечує його переміщення (рис. 3.5).

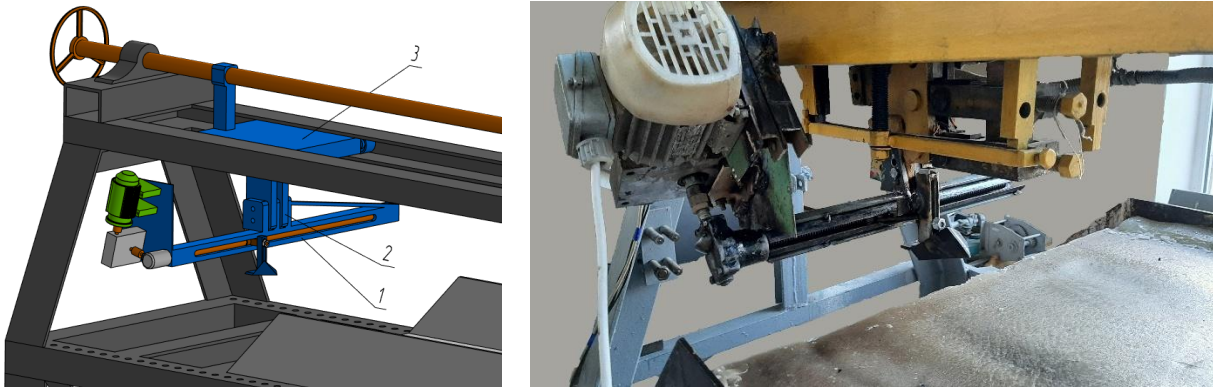


Рисунок 3.5. Робочий орган закріплений у візку

1 - привід рухомого просторово орієнтованого ножа; 2 – провущини; 3 – тензометричний візок

На рисунку 3.6, зображено розміщення електродвигуна, черв'ячної та конічної передачі на фланці робочого органу, таке розміщення розроблялось для винесення електродвигуна та передач подалі від робочої зони, бункера з дослідним матеріалом, та для легкого підключення проводів керування електродвигуном.

Також таке розміщення повинно менше впливати на тензометричні балочки які розміщені в візку. Але недоліком даного розміщення є винесення маси далі від кріплень провущин що створює перекидний момент і впливає на точне налаштування просторово орієнтованого ножа [84].

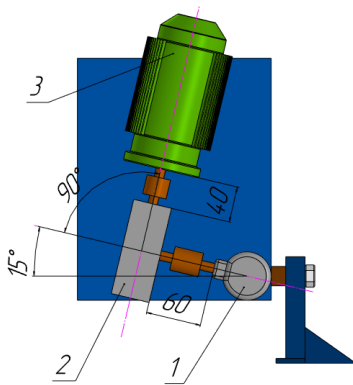


Рисунок 3.6. Розміщення електродвигуна приводу ножа та передач
1 – конічна передача; 2 – черв'ячна передача; 3 - електродвигун

Для вирішення недоліку з перекосом робочого органу через віднесення електродвигуна та передач, нами було виконано боковий упор (рис. 3.7), який упирається в провущину тим самим компенсуючи відхилення створені масою на іншому плечі робочого органу [85, 86].

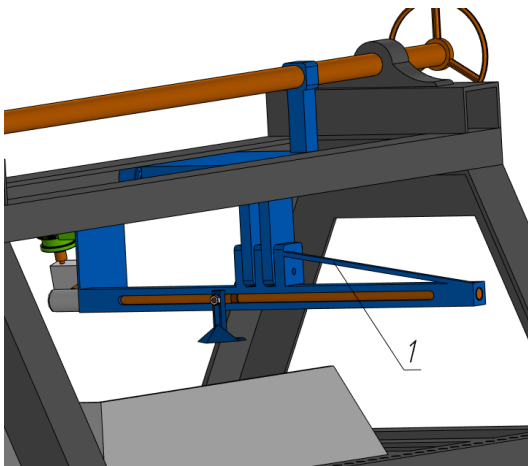


Рисунок 3.7. Боковий упор

Наступним нами була спроектована 3D модель, рухомого просторово орієнтованого ножа (рис. 18, 19), з дотриманням усіх параметрів які використовувались в розрахунках сил різання, та коефіцієнтів подібності.

Для моделі просторово орієнтованого ножа було обрано, двогранний ніж, з поверхнями бокового різання які мають нахил в 45° та ріжучими кромками (які відповідають куту повороту ножа в плані), також під 45° , бо ще професором В.М. Смірновим було експериментально доведено що доцільно надавати різальному інстру-

менту землерийних машин кута різання не більше $35-40^\circ$ і кута повороту в плані не більше $30-45^\circ$ для найбільш продуктивного різання ґрунту.

Також в кріпленні ножа запроектовано прорізь через яку ніж закріплюється до передачі гвинт гайка, другим завданням прорізі є налаштування глибини різання так як сам робочий орган є досить об'ємним і його опускання може призводити до того що при проведенні експериментального дослідження він може зачіпати бункер з дослідним матеріалом, що є неприпустимим.

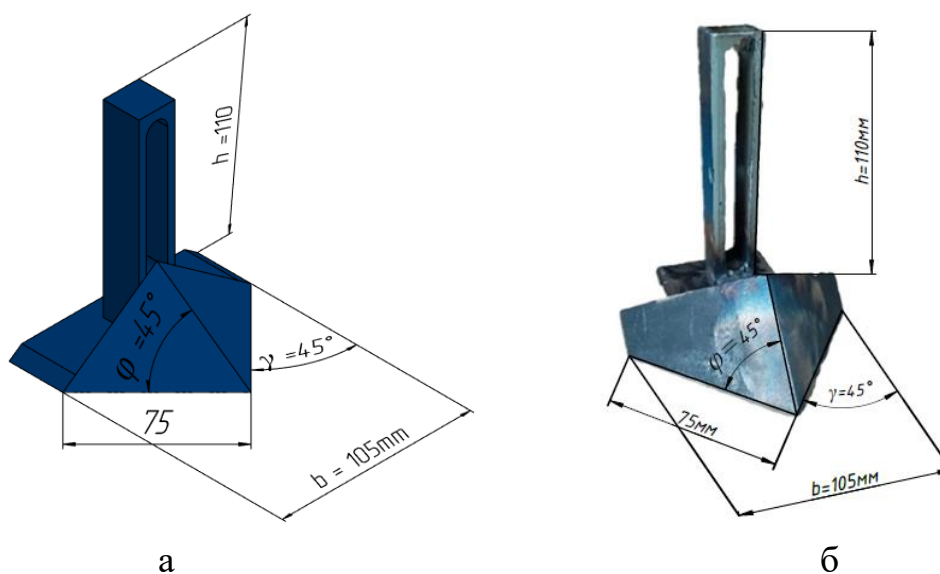


Рисунок 3.8. Модель просторово орієнтованого ножа

а – 3D модель; б – натурна модель

Наступним кроком було проведено комп'ютерне моделювання навантаження, робочого органу, у відповідності з робочою гіпотезою.

Для проведення комп'ютерного моделювання спочатку було підібрано матеріали (табл.3) з який буде виготовлена модель просторово орієнтованого ножа та проушин, далі до граней ножа було прикладення навантаження (рис. 21) відповідне до максимальної сили різання що відображена на графіку (рис. 20), та являє собою 6500 Н (табл. 5).

Інформація про використаний матеріал та його фізичні властивості занесені до таблиці 4, потім програмно було створено сітку кінцевих елементів (рис. 22) а параметри розбиття занесено до таблиці 6.

Наступним були визначені інерційні характеристики моделі (табл. 7), та реакції в опорах (табл. 8).

Маючи всі вищеописані показники, за допомогою комп'ютерного моделювання було визначено і візуалізовано еквівалентів напруження (рис. 23, табл. 9), суми лінійного переміщення (рис. 24, табл. 10), коефіцієнт запасу по межі текучості (рис. 25, табл. 11), коефіцієнт запасу по межі міцності (рис. 26, табл. 12), та коефіцієнт запасу втрати стійкості (табл. 13).

Також було проведено розрахунку власних частот (табл. 14), для розуміння стійкості та міцності змодельованої конструкції робочого органу [87, 88].

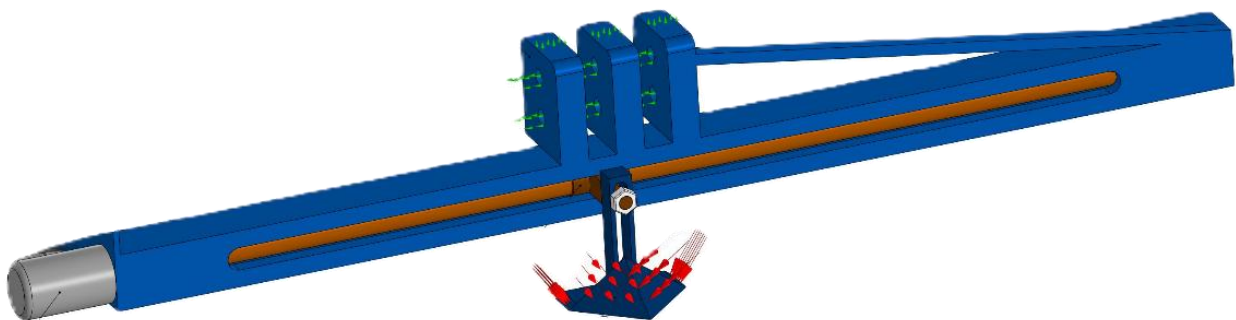


Рисунок 3.9. Прикладання навантажень до граней просторово орієнтованого ножа

Таблиця 3.2. Інформація про матеріал

Межа текучості [Н/мм ²]	235
Модуль пружності[Н/мм ²]	200000
Коефіцієнт Пуассона	0,3
Густина [кг/мм ³]	0,000008
Температурний коефіцієнт лінійного розширення[1/°C]	0,000012

Теплопровідність [Вт/(°С·мм)]	0,055
Межа міцності при стиску [Н/мм ²]	410
Межа міцності (Тимчасовий опір) [Н/мм ²]	410
Межа витривалості при розтязі [Н/мм ²]	209
Межа витривалості при крученні [Н/мм ²]	139

Таблиця 3.3. Інформація про навантаження

Назва	Обрані об'єкти	Параметри навантаження
Тиск 1	Грань: 1	Величина: 6500 Н
Тиск 2	Грань: 2	Величина: 6500 Н

Таблиця 3.4. Кінцево-елементна сітка параметри і результати розбиття

Назва	Значення
Тип елементів	10 – вузлові тетраедри
Максимальна довжина сторони елемента [мм]	100
Максимальний коефіцієнт згущення на поверхні	1,2
Коефіцієнт розрідження в об'ємі	1,5
Кількість кінцевих елементів	11378
Кількість вузлів	23321

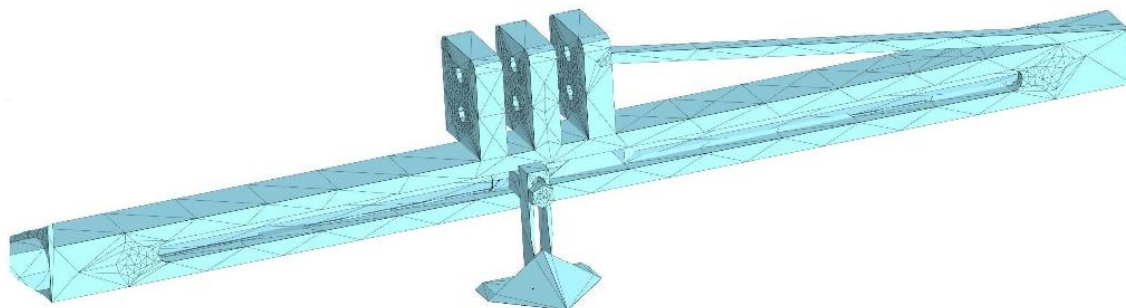


Рисунок 3.10. Кінцево елементна сітка

Таблиця 3.5. Інерційні характеристики моделі

Назва	Значення
Маса моделі [кг]	39,23
Центр мас моделі [мм]	(-577,45; -32198; 1733,38)
Моменти інерції моделі відносно центру мас [кг·мм ²]	(4884881,07; 316829,72; 4731127,02)
Реактивний момент відносно центру мас [Н·мм]	(-263315,26; 860409,55; -706540,76)
Сумарна реакція опор [Н]	(-2860,67; 3309,138546; 4679,83)
Абсолютне значення реакції [Н]	6405,83
Абсолютне значення моменту [Н·мм]	1144045,17

Таблиця 3.6. Реакції в опорах

R _x [Н]	R _y [Н]	R _z [Н]
-2860,67	3309,13	4679,83

Таблиця 3.7. Еквівалентне напруження

Назва	Тип	Мінімальне значення	Максимальне значення
Еквівалентне напруження	SVM [Н/мм ²]	0,000009	2244,03

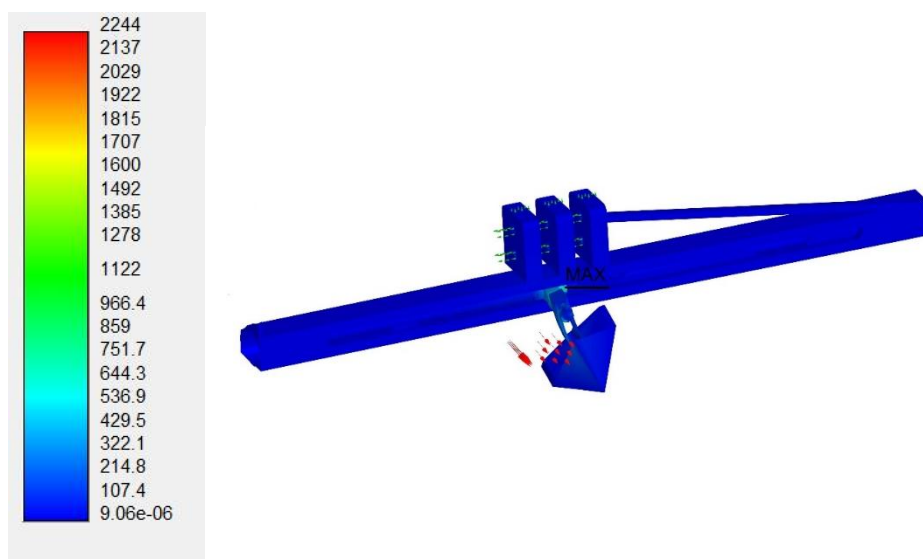


Рисунок 3.11. Візуалізація еквівалентного напруження

Таблиця 3.8. Сумарне лінійне переміщення

Назва	Тип	Мінімальне значення	Максимальне значення
Сумарне лінійне переміщення	USUM [мм]	0 мм	1,29 мм

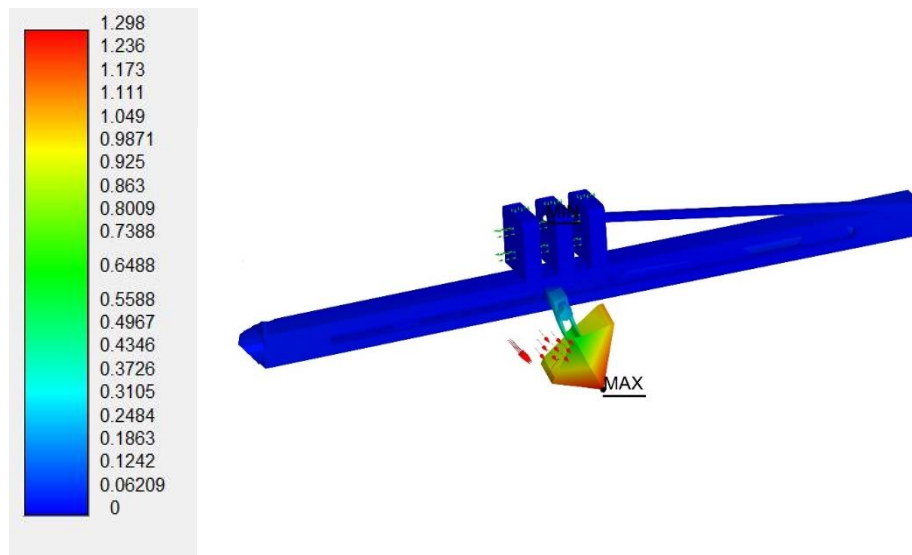


Рисунок 3.12. Візуалізація сумарного лінійного переміщення

Таблиця 3.9. Коефіцієнт запасу по межі текучості

Назва	Тип	Мінімальне значення	Максимальне значення
Коефіцієнт запасу по межі текучості	SVM	0,32	10

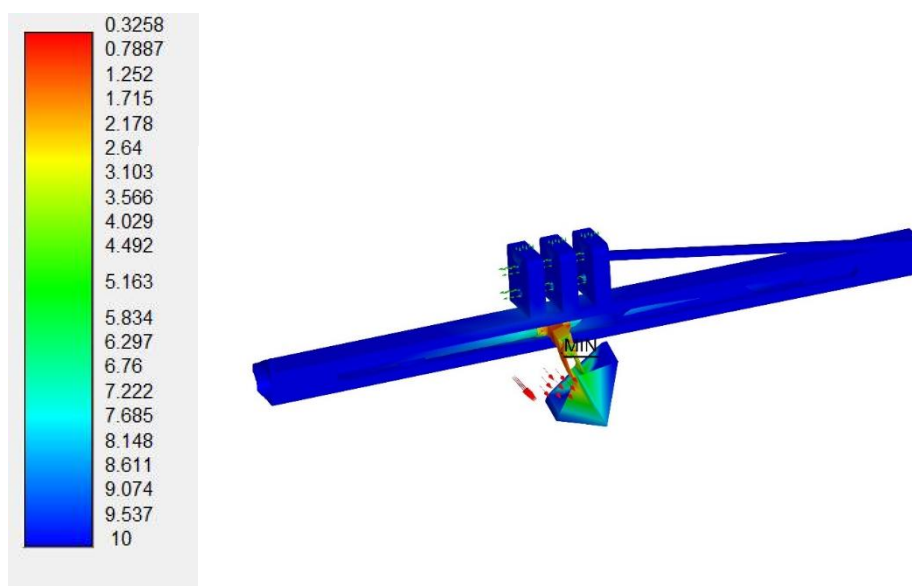


Рисунок 3.13. Візуалізація запасу по межі текучості

Таблиця 3.10. Коефіцієнт запасу по межі міцності

Назва	Тип	Мінімальне значення	Максимальне значення
Коефіцієнт запасу по межі міцності	SVM	0,56	10

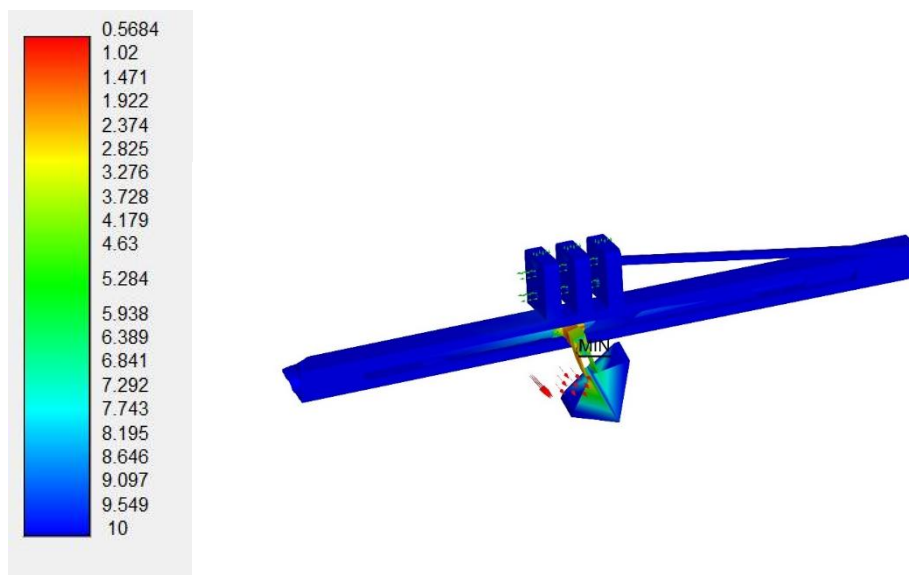


Рисунок 3.14. Візуалізація запасу по межі міцності

Таблиця 3.11. Результати розрахунку стійкості

№	Коефіцієнт запасу втрати стійкості
1	0,000305

Таблиця 3.12. Результати розрахунку власних частот

№	Частота [рад/с]	Частота [Гц]	Період [с]	м.м. X [%]	м.м. Y [%]	м.м. Z [%]
1	295,1379	46,9726	0,0212	28,9390	0,3811	10,0909
2	306,7136	48,8149	0,0204	11,7948	9,6298	17,4117
3	688,3180	109,5492	0,0091	0,0005	3,2663	10,8196
4	710,2159	113,0343	0,0088	4,7029	5,04439	5,7934
5	861,8333	137,1650	0,0072	0,9766	3,6766	6,6415
6	978,8034	155,7814	0,0064	13,6691	0,0152	0,5400
7	1253,7486	199,5402	0,0050	0,0120	0,2617	0,1607
8	1522,4199	242,3006	0,0041	0,7444	0,0140	13,4852
9	2052,6683	326,6923	0,0030	5,1584	8,2485	0,0001

3.4. Вимірювально-реєстраційне обладнання.

Для вимірювання складових сил різання взаємодії, рухомого просторово орієнтованого ножа з робочим середовищем, застосовано комплект вимірювально-реєстраційної апаратури (рис. 3.15). До якої входять: блок живлення, кабель живлення модуля АЦП (аналогово-цифровий перетворювач) з шестиканальним підсилювачем та мікроконтролерним блоком керування, кабель передачі сигналу (інтерфейс SCI – SerialCommunicationInterface) та персональний комп'ютер [89, 90].



Рисунок 3.15. Вимірювально-реєстраційна апаратура

На бокових поверхнях тензобалки 1 наклеєні тензодатчики D1-D4, що реєструють дотичну силу P , яка діє на просторово орієнтований ніж. На горизонтальній тензобалці 2 – тензодатчики D5-D8, що реєструють нормальну силу N , яка діє під час різання робочого середовища, на рухомий просторово орієнтований ніж (рис. 3.16).

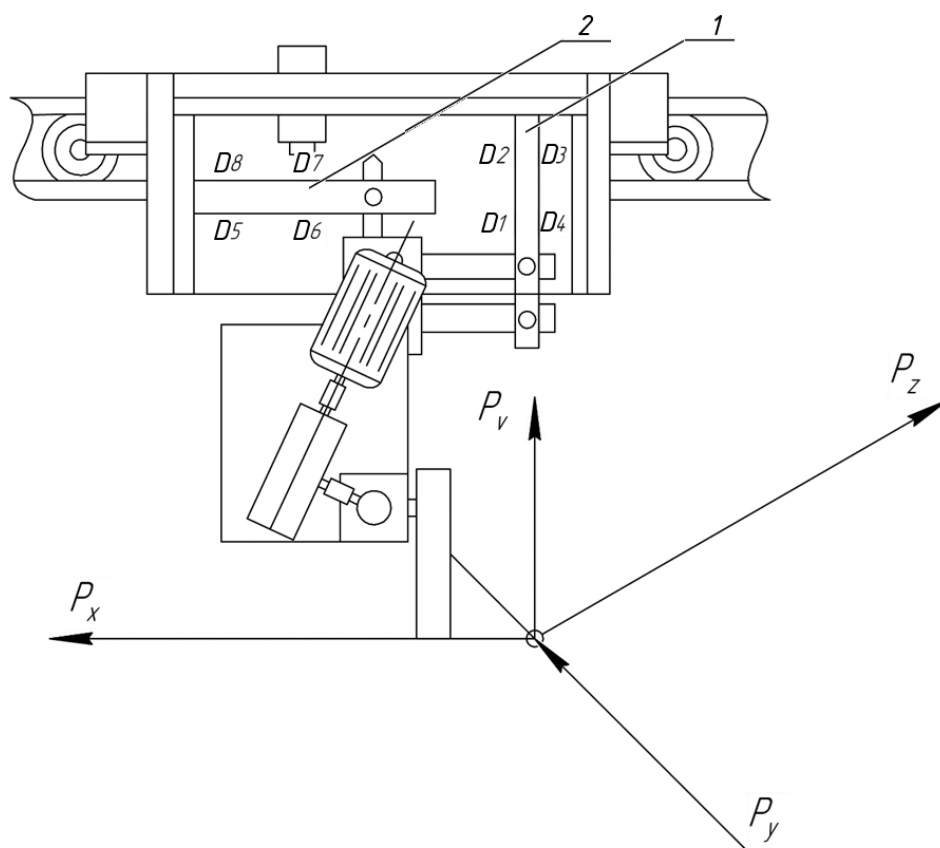


Рисунок 3.16. Схема розташування тензодатчиків на динамометричному візку

Групи тензодатчиків включено в електричні мостові схеми, що показані на (рис. 3.17). Сила різання, через конструкцію просторово орієнтованого ножа передається тензодатчикам деформації, який трансформуються в зміну опору вимірювальних елементів, так у всіх мостових схемах з'являється розбаланс.

В основу методів вимірювання датчиками опору покладений тензометричний ефект – зміна електричного (тобто омичного) опору металевого дроту датчика при його пружній деформації [91, 92, 93].

Датчики наклеєні на поверхню тензометричної балки, що деформується, полімерним клеєм по спеціальній технології. При проходженні через датчики електричного струму в результаті деформації тензометричної балки змінюється опір датчиків. В результаті зміниться напруга в електричному ланцюзі. Оскільки деформація пропорційна силам, які її викликають, то їм буде пропорційна зміна напруги струму в електричному колі.

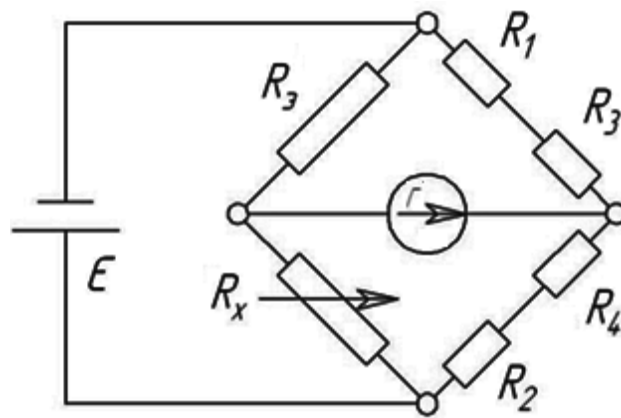


Рисунок 3.17. Схема з'єднання тензометричних датчиків у вимірювальні мости

Датчики з'єднуються в мостову схему. В даному випадку на кожному тензометричному балочку наклеєно по чотири датчики, які одночасно виконують функції робочих та компенсаційних датчиків. Таке підключення датчиків дозволяє реєструвати тільки різницю напруги на базовій ділянці балочки ℓ_i , замкненій між датчиками.

Станові балансу тензометричних схем при вимірюванні дотичної та нормальної складової сил, що діють на рухомий просторово орієнтований ніста відповідають рівності 3.9 та 3.10.

$$(R_1 + R_3)R_x = (R_2 + R_4)R_C, \quad (3.9)$$

$$(R_5 + R_7)R_x = (R_6 + R_8)R_C. \quad (3.10)$$

де $R_1 \dots R_8$ – опір тензодатчиків (плечі моста опору); R_C – еталонний опір; R_x – вимірювальний опір.

Сигнал розбалансу вимірювальних мостів підсилюється за допомогою інструментальних операційних підсилювачів (рис. 3.18), які підключенні за схемою диференціального підсилювача (рис. 3.19) з гасінням синфазних перешкод.

Завдяки підсилювачу вдається підсилити дуже малий рівень електричних коливань з уникненням паразитних шумів та прямою передаточною характеристикою.

Завдяки підключенню за такою схемою відбувається уникнення дрейфу нуля, який присутній у звичайних схемах операційних підсилювачів [94, 95, 96].

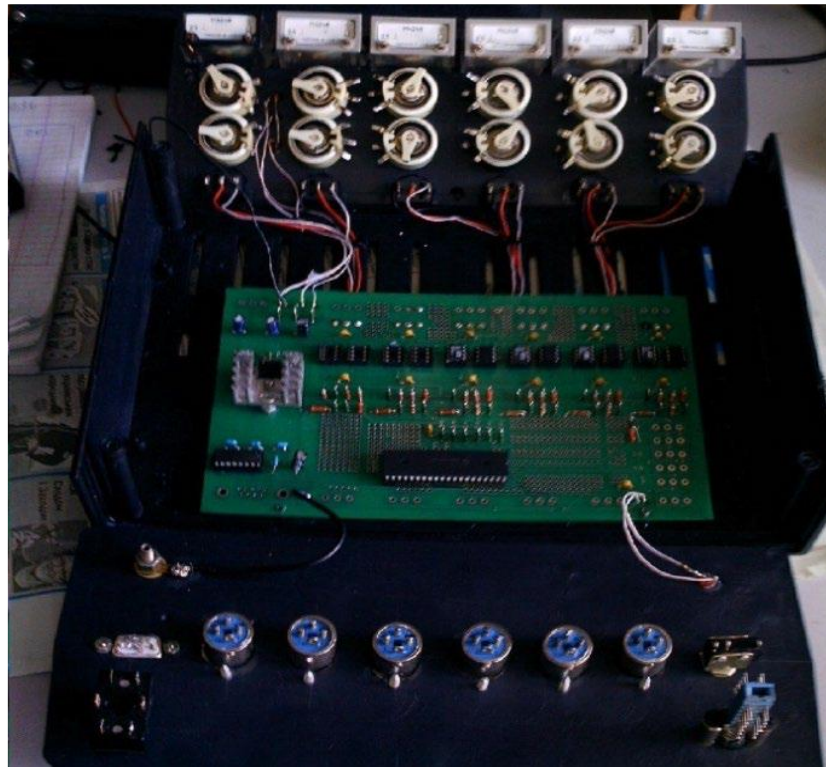


Рисунок 3.18. АЦП з блоком підсилювачів

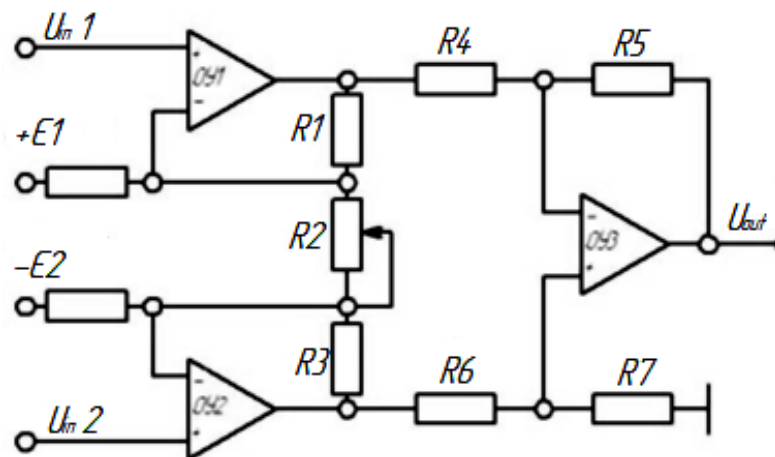


Рисунок 3.19. Схема диференціального підсилювача

За умови $R4 R7 = R5 R6$ передаточну функцію можна представити у вигляді:

$$U_{вих} = \frac{R_5}{R_4} \left(1 + \frac{R_1}{R_2} + \frac{R_3}{R_2} \right) (U_{вх2} - U_{вх1}) \quad (3.11)$$

В якості операційних підсилювачів використані сучасні інструментальні підсилювачі виробництва Analog Devices.

Підсилений сигнал подається на модуль АЦП для подальшої обробки. Прилад працює в двох режимах з коефіцієнтом підсилення сигналу 1 та 2.

В якості АЦП використаний 10-ти розрядний модуль, який входить до складу мікроконтролера сімейства PIC (Peripheral Interface Controller) (рис. 3.8).

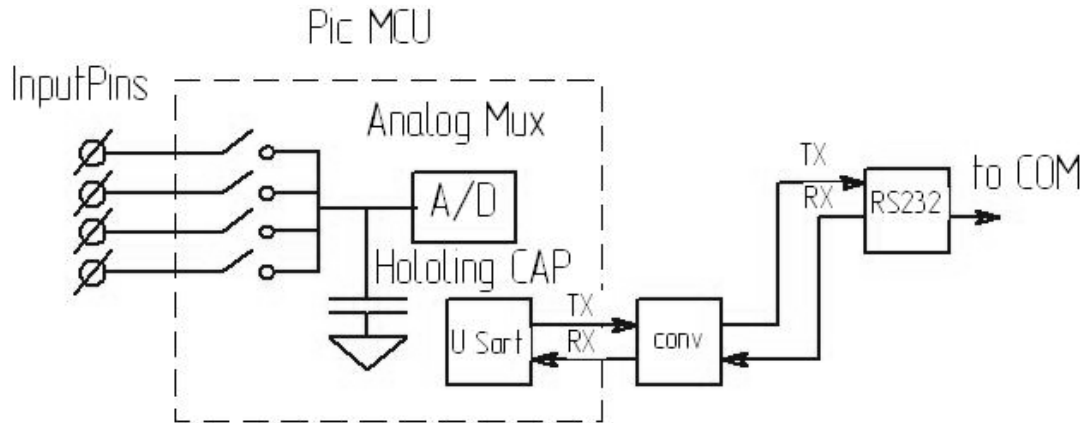


Рисунок 3.20. Загальна схема пристрою для АЦП

Час перетворення АЦП для запропонованого контролера визначається за формулою:

$$T_{AD} = N \cdot T'_{AD} + (11 - n)(2T_{OSC}) \quad (3.12)$$

де T'_{AD} – час аналого-цифрового перетворювання на один біт (рекомендовано $1,6 \cdot 10^{-6}$); n – кількість розрядів АЦП; T_{OSC} – тривалість одного такту синхронізуючих імпульсів.

В середньому при частоті тактового генератора 20 МГц час перетворення по одному каналу складає $17,6 \cdot 10^{-6}$.

При цьому точність перетворення залежить від кроку квантування [97], який слід розрахувати за формулою:

$$\Delta_u = \frac{U_{REF}}{2^n} \quad (3.13)$$

де U_{REF} – опорна напруга (5В);

$$\Delta_u = \frac{5}{2^{10}} = \frac{5}{1024} = 4.9mB \quad (3.14)$$

Інтерфейс RS232 має нетипові рівні напруг, тому для узгодження з рівнями інтерфейсу мікроконтролера необхідно використовувати перетворювач CONV (рис. 3.8).

Цифровий сигнал подається на комп'ютер для подальшої обробки за допомогою спеціально розробленої програми, під назвою “Tenzo Cut”.

У результаті відбувається реєстрація сигналу в реальному часі та виведення його на екран у вигляді графіка (рис. 3.9).

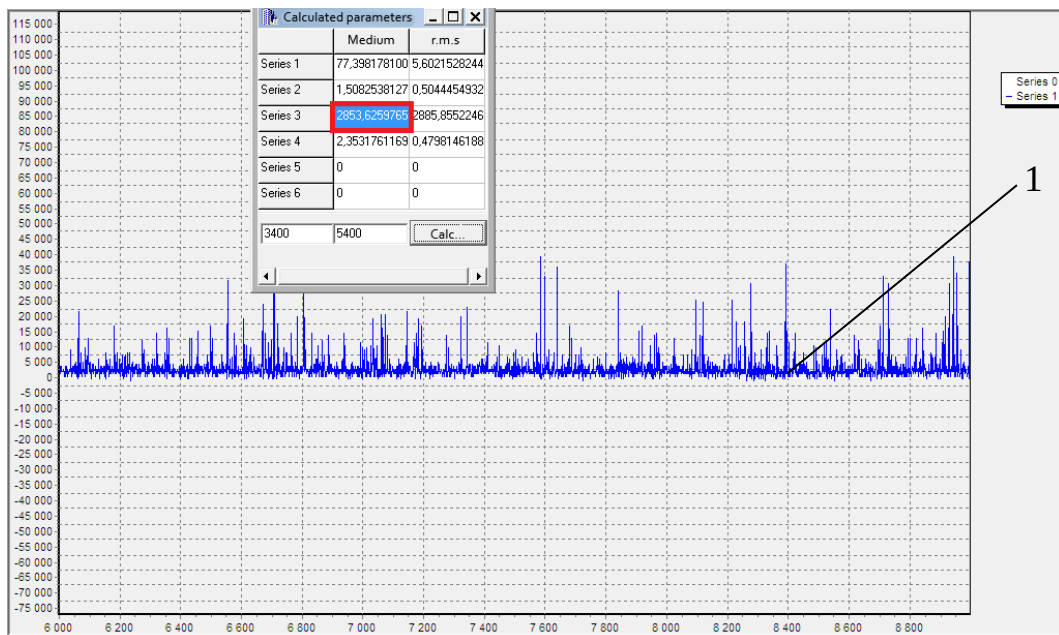


Рисунок 3.21. Вигляд відтвореного сигналу на екрані:

1 – крива сили різання

Програма “Tenzo Cut” дозволяє:

- одночасно реєструвати дані з декількох груп датчиків (до шести);
- приводити дані до загальної ординати зображення;
- проводити тарування, тобто перехід від ординати зображення, до сили різання ґрунту (рис. 3.10);
- обробляти дані (знаходити середнє значення та середньоквадратичне відхилення на заданому проміжку) (рис. 3.11);
- зберігати дані в файлі на будь-якому етапі реєстрації та обробки;

– зберігати дані у вигляді таблиці чисел для подальшої обробки іншими програмами аналізу табличних даних (наприклад, Origin або MicrosoftExcel).

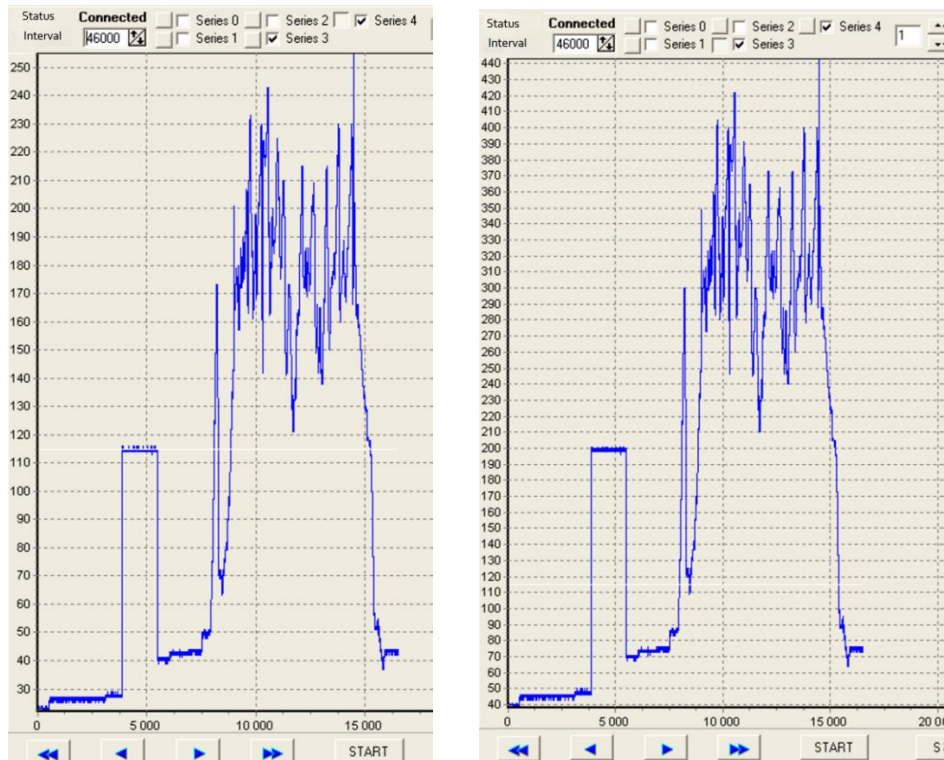


Рисунок 3.22. Тарування
а – до тарування, б – після тарування

	Medium	r.m.s
Series 1	77,398178100	5,6021528244
Series 2	1,5082538127	0,5044454932
Series 3	2853,6259765	2885,8552246
Series 4	2,3531761169	0,4798146188
Series 5	0	0
Series 6	0	0

3400 5400 [Calculated]

Рисунок 3.23. Вікно з результатами розрахунків

Розроблене у КНУБА високотехнологічне вимірювально – реєструюче обладнання, дозволяє швидко і без повторювань, з першочергових даних, отримувати точні оцінки взаємодії робочого середовища, з рухомих просторово орієнтованих но-

жем, та дає можливість обробляти їх за допомогою сучасного програмного забезпечення, що позбавить від трудомісткого процесу обробки даних.

Перед проведенням досліду виконується тарування тензометричних балочок. Тарування тензометричних балок перед проведенням дослідів (рисунок 16) проводилось механічним навантаженням в напрямку кожної із складових повної сили різання за допомогою динамометра.

Динамометр одним фіксатором закріплювався до механізму тарування, а іншим – до тензобалки. За допомогою механізму пересування проводилось навантаження та фіксація сигналу реєструючою апаратурою [98, 111, 112].

На рисунку 16в, зображений графік тарування тензобалок, де показано залежності величини сигналу від величини зусилля при навантаженні та розвантаженні.

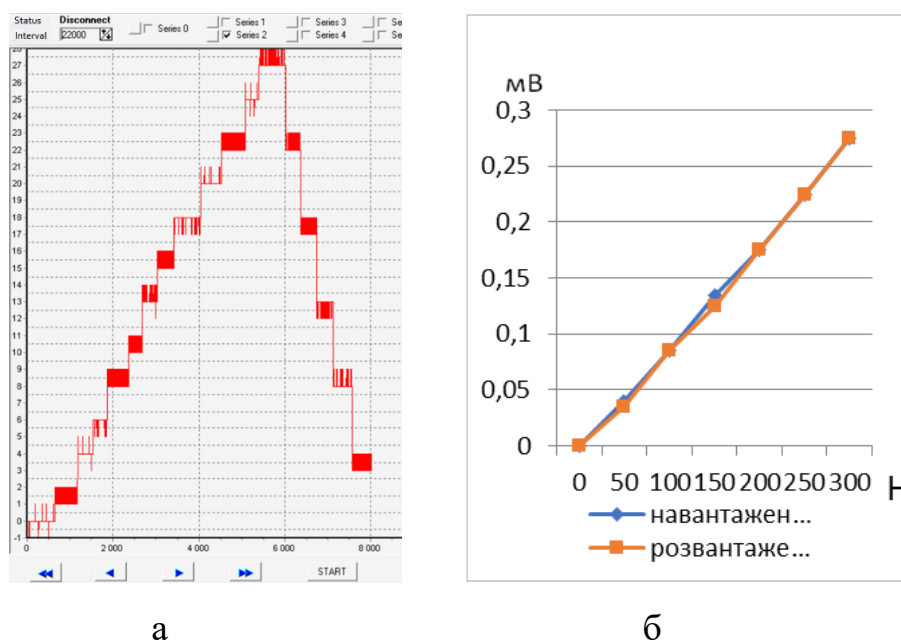


Рисунок 3.24. Тарування тензометричних балок: а) осцилограма; б) графік тарування

3.5. Методика планування експериментальних досліджень, обробки та узагальнення даних.

При проведенні експериментальних досліджень досить часто використовується фізичне моделювання, що дозволяє перевірити відповідність складеної математи-

чної моделі чи дослідити складні явища при неможливості побудови математичної моделі.

Оцінка взаємодії просторово орієнтованого ножа з робочим середовищем здійснювалась за основою однофакторного експерименту завдяки застосуванню високотехнологічного вимірювально-реєструючого обладнання, що дозволило швидко з першочергових даних отримувати точні результати.

Обробка осцилограм полягала у визначенні середньомаксимальної ординати сили різання P та знаходження її середнього значення.

Необхідне число повторень дослідів для визначення однофакторної залежності визначалося з рівняння [99]:

$$P^* \left\{ \left| \Delta_x \right| \leq \frac{z}{\sqrt{n}} W_x \right\} = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_0^z e^{-\frac{t^2}{2}} dt \quad (3.15)$$

де P^* – ймовірність виконання нерівності у фігурних дужках;

Δ_x – відношення відхилення емпіричного середнього значення випадкової величини x від його істинного середнього значення;

n – число вимірів величини x ;

W_x – коефіцієнт варіації величини x ;

z – верхня межа інтегралу ймовірності, що характеризує ймовірність влучення середнього значення в заданий довірчий інтервал.

З виразу (1) визначаємо необхідне число вимірів сили різання при кожному сполученні умов дослідів

$$n \geq \frac{z^2 W_x^2}{\Delta_x^2} \quad (3.16)$$

де величина z визначається по таблицях інтеграла ймовірності відповідно до заданої ймовірності P^* .

На рисунку 1 наведено графіки залежності $n(Wp)$ при різних значеннях Δ_x та P^* . Наприклад, при відносному відхиленні $\Delta_x=0,1$, та ймовірності $P^*=0,95$, необхід-

не число вимірювань сили різання, для значень коефіцієнта варіації, в межах 0,2 – 0,3, повинно бути 15-35. Повторність дослідів, знаходилась в інтервалі від 3 до 5 (при числі вимірів у кожному досліді від 200 до 500), що при коефіцієнті варіації дослідних величин від 0,2 до 0,3, відповідає вірогідності отриманих даних від 0,90 до 0,95 [100, 101, 102].

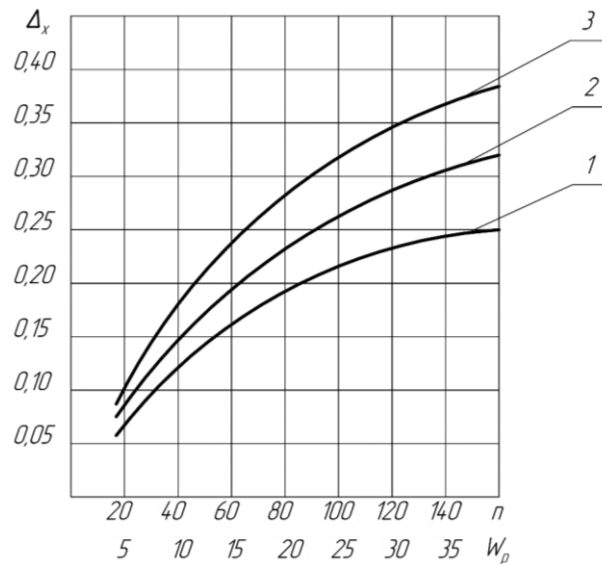


Рисунок 3.25. Графік для визначення необхідного числа вимірів сили різання при заданій точності і надійності результатів дослідів:

1 – $P^*=0,99$; 2 – $P^*=0,95$; 3 – $P^*=0,9$

Для перевірки адекватності результатів теоретичних розрахунків, проведено порівняльний аналіз аналогічних параметрів, визначених експериментально. Величини сил різання, що виконують роботу по руйнуванню і подоланню опору ґрунту різанню, що визначались теоретичним шляхом, із врахуванням коефіцієнтів подібності, використаних при фізичному моделюванні, для наведеного лабораторного стенда реєстрації сил різання, рухомим просторово орієнтованим ножом. Для порівняння з результатами сил різання, визначених експериментальним шляхом на даному стенді.

Похибка визначення сили різання, отриманих теоретичним та експериментальним шляхом, визначається залежністю:

$$\Delta_{\delta} = \frac{|\delta_E - \delta_T|}{\delta_E} \cdot 100. \quad (3.17)$$

де δ_E – значення з графіку, отримане експериментальним шляхом; δ_T – значення з графіку, отримане теоретичним шляхом.

3.6. Проведення експериментального дослідження та порівняння експериментальних та теоретичних даних

Для експериментальних досліджень зазвичай використовують натурні об'єкти досліджень та їхні моделі. У натурному експерименті засоби експериментального дослідження безпосередньо взаємодіють з об'єктом дослідження, а в модельному — з його змодельованим прототипом. При проведенні модельних експериментальних досліджень, модель виступає як засіб експериментального дослідження, так і безпосередній об'єкт дослідження [103, 106, 113, 114].

Експериментальне дослідження було проведено наступним чином.

На лабораторному стенді для реєстрації сил різання, у візок обладнаний тензOMETричним тарувальним механізмом, закріплювався привід для перпендикулярного руху, рухомого просторово-орієнтованого ножа. Бункер з випробовуваним матеріалом жорстко закріплювався на монтажній поверхні .

Як випробовуваний матеріал, було використано робоче середовище з фізико-механічними характеристиками, наведеними в Таблиці 1.

Після цього, для верифікації, правильності переміщення, рухомого просторово орієнтованого ножа згідно до робочої гіпотези, використовувалися наклейка мітка (рис. 3.26) та дві модельні шкали (додаток Г).



Рисунок 3.26. Встановлення мітки в центрі ріжучої кромки

Першою верифікувалась, швидкість подачі просторово-орієнтованого ножа в зону різання (рис. 3.27) забезпечувалася запуском привідного двигуна через частотний перетворювач «Freson» FR150A.

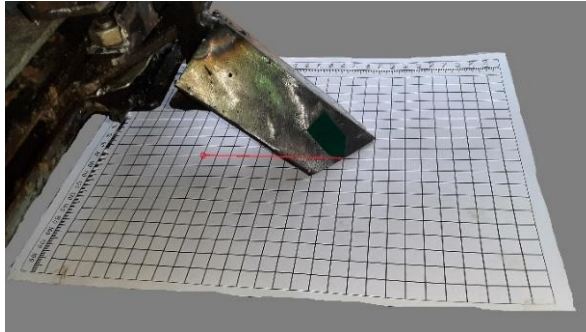


Рисунок 3.27. Перевірка швидкості подачі просторово-орієнтованого ножа за допомогою модельної шкали

Другою піддавалась верифікації, швидкість ортогонального переміщення, рухомого просторово орієнтованого ножа (рис. 3.28) забезпечувалася шляхом запуску привідного двигуна через частотний перетворювач «Suswe» T13-750W-12-H.

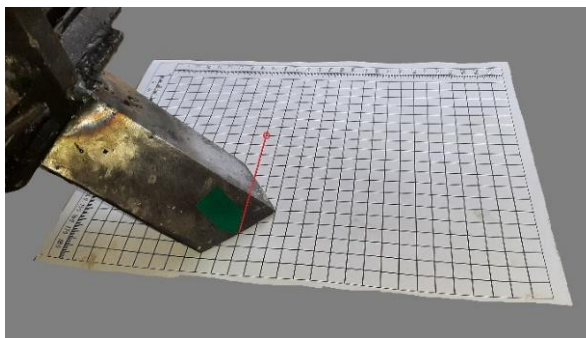


Рисунок 3.28. Перевірка швидкості поперечного руху просторово-орієнтованого ножа за допомогою модельної шкали

Використовуючи одночасно два частотні перетворювачі можна змінювати частоту струму привідних двигунів, що, у свою чергу, призводить до зміни швидкості руху візка та просторово-орієнтованого ножа, що забезпечить рух відповідно до робочої гіпотези.

Для перевірки кутового переміщення, рухомого просторово-орієнтованого ножа, використовувалася модельна шкала з кутовими поділками. Рухомий просторово орієнтований ніж був встановлений у нульове положення (рис. 3.29), а потім

протестований, відповідно до робочої гіпотези, при різних співвідношеннях швидкостей (рис. 3.30. а, б, в) [104].

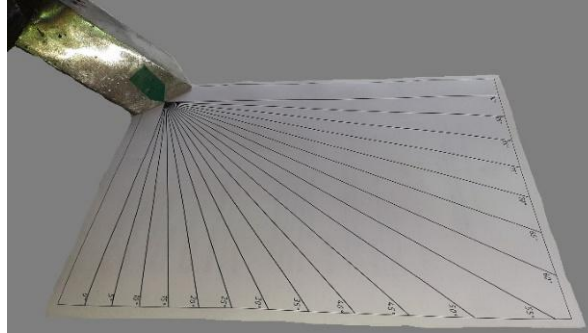
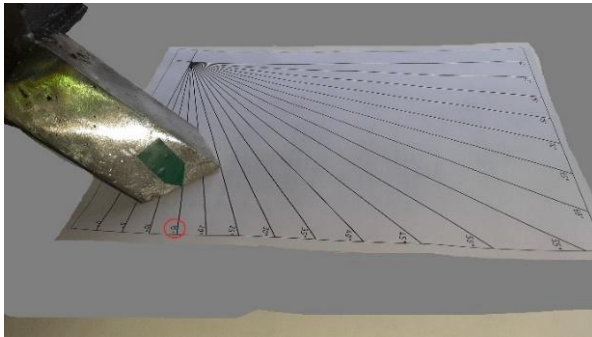
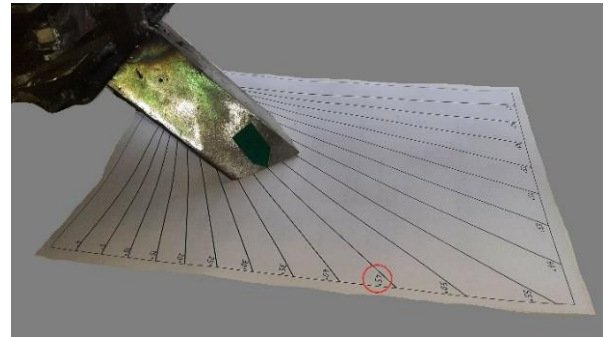


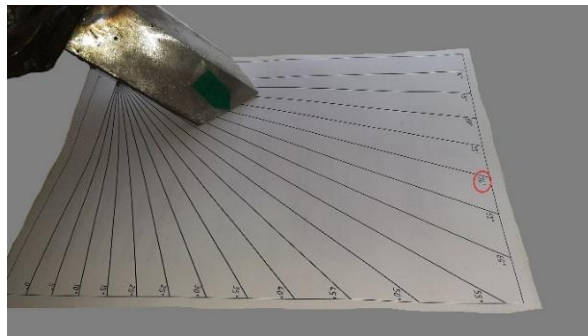
Рисунок 3.29. Встановлення просторово-орієнтованого ножа на макетній шкалі (з кутовими поділками, ціна поділок 5°)



а)



б)



в)

Рисунок 3.30. Перевірка кутового руху просторово-орієнтованого ножа за допомогою модельної шкали (За кутовими поділками: а) рух при співвідношенні швидкостей, що забезпечує $\alpha = 15^\circ$; б) рух при співвідношенні швидкостей, що забезпечує $\alpha = 45^\circ$; в) рух при співвідношенні швидкостей, що забезпечує $\alpha = 70^\circ$.)

Для експериментального дослідження було обрано переміщення, рухомого просторово орієнтованого ножа, при куту α що дорівнював 0° , 20° , 40° , 60° та 80° .



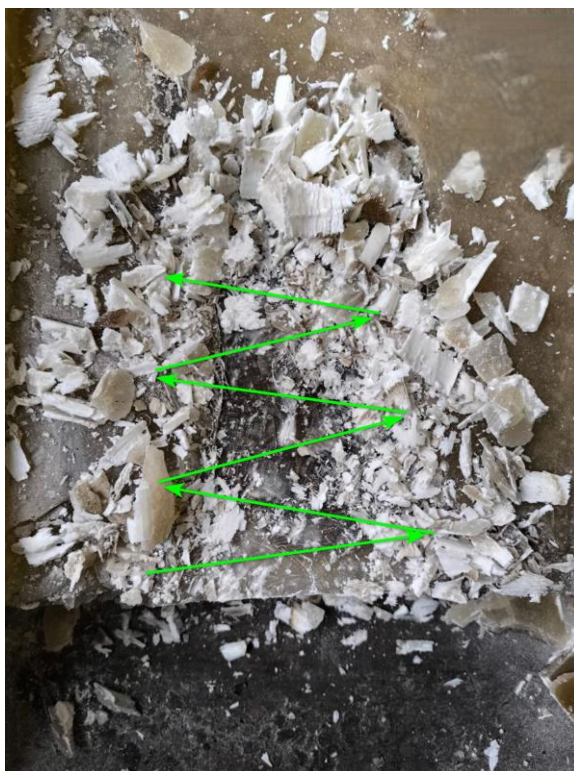
Рисунок 3.31. Процес різання парафіну рухомим просторово орієнтованим ножом



а



б



В

Рисунок 3.32. Загальний вигляд прорізів після проведення експериментальних досліджень:

а – проріз при куту напрямку сили різання $\alpha = 0^\circ$; б – проріз при куту напрямку сили різання $\alpha = 60^\circ$; в – проріз при куту напрямку сили різання $\alpha = 80^\circ$

Для цих кутів, з урахуванням коефіцієнтів подібності, було виведено сили різання (табл. 3.14) у відповідності до отриманих теоретичних даних (табл. 3.13).

Таблиця 3.13. Сили різання, визначені теоретично

α	Сила різання ґрунтів P , кН		
	Теоретичні дані		
	Суглинок	Мергелиста глина	Аргіліт
0°	3,86	6,25	9,18
20°	3,96	6,19	9,73
40°	3,96	5,75	10,8
60°	2,59	4,59	4,98
80°	2,19	3,71	4,21

Таблиця 3.14. Сили різання, приведені коефіцієнтами подібності

α	Сила різання ґрунтів P , кН		
	Суглинок	Мергелиста глина	Аргіліт
0°	0,84	3,37	10,1
20°	0,87	3,34	10,7
40°	0,87	3,1	11,88
60°	0,56	2,47	5,47
80°	0,48	2	5,12

На основі даних (табл. 3.14) були побудовані графіки зміни сили різання, залежно від кута напрямку сили різання.

Графічне відображення даних, отриманих після застосування коефіцієнтів подібності, на (рис. 3.33).

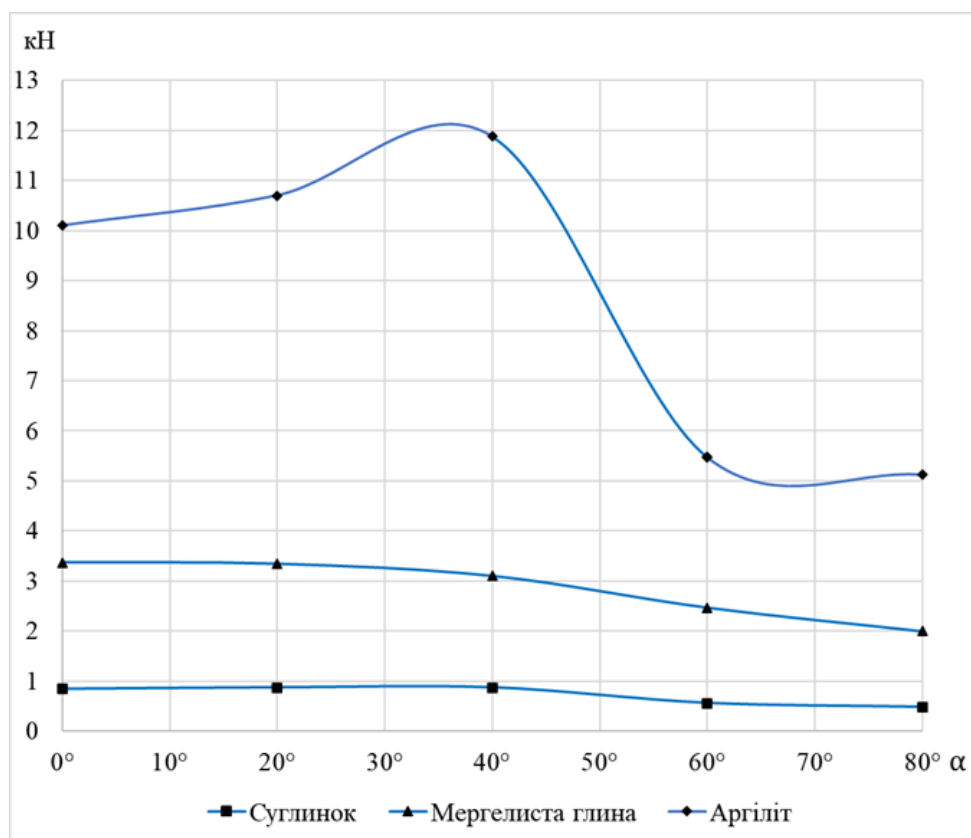


Рисунок 3.33. Графік сил різання на основі теоретичних даних

Під час експериментальних досліджень ми одночасно вимірювали нормальні та ортогональні зусилля різання, які виконують роботу руйнування та подолання опору ґрунту різанню. Методи вимірювання опору за допомогою датчиків опору

ґрунтуються на тензометричному ефекті (тобто на зміні електричного (омного) опору металевого дроту датчика під час його пружної деформації за допомогою тензометричних балок). Сигнал посилювався сучасними інструментальними підсилювачами виробництва Analog Devices. Як аналого-цифровий перетворювач (АЦП) був використаний 10-розрядний модуль, що є частиною сімейства мікроконтролерів PIC (Peripheral Interface Controller). Таким чином, дані вимірювань були записані за допомогою високотехнологічного вимірювально-реєструючого обладнання, що дозволило швидко та без повторень отримати достатньо точні оцінки взаємодії просторово-орієнтованого ножа відвального обладнання з первинними даними. Отримані результати у вигляді масиву точок були записані в реальному часі (осцилограми) (рис. 3.34 – 3.36). Осцилограми отримані в решті досліджень, при $\alpha = 0^\circ$, 20° , 40° та 80° , наведені в додатку Д.

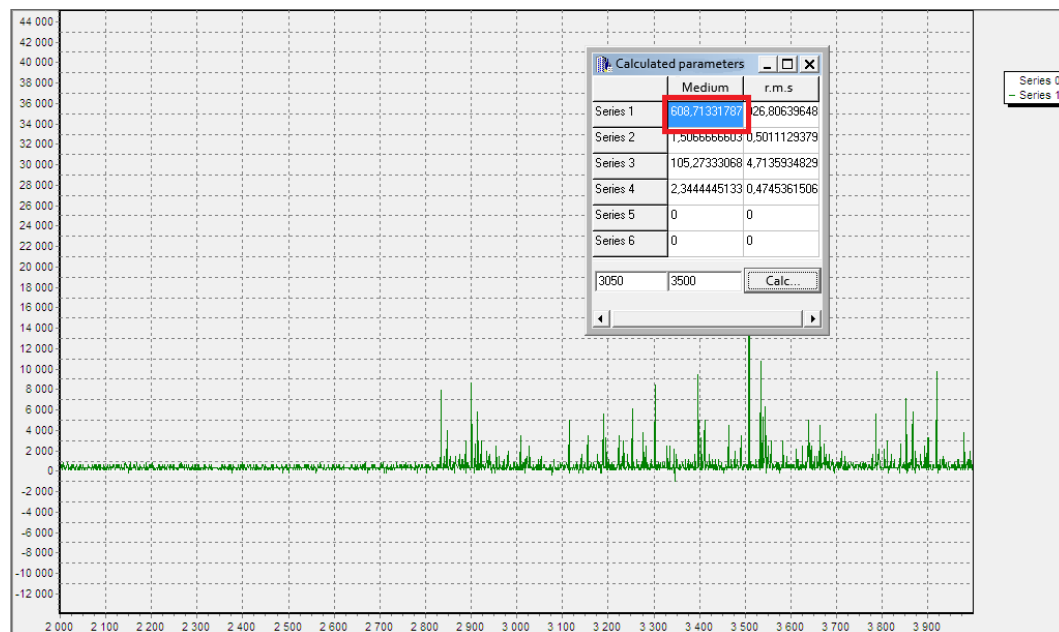


Рисунок 3.34. Осцилограма сил різання ґрунту III категорії при куті напрямку сил різання $\alpha = 60^\circ$

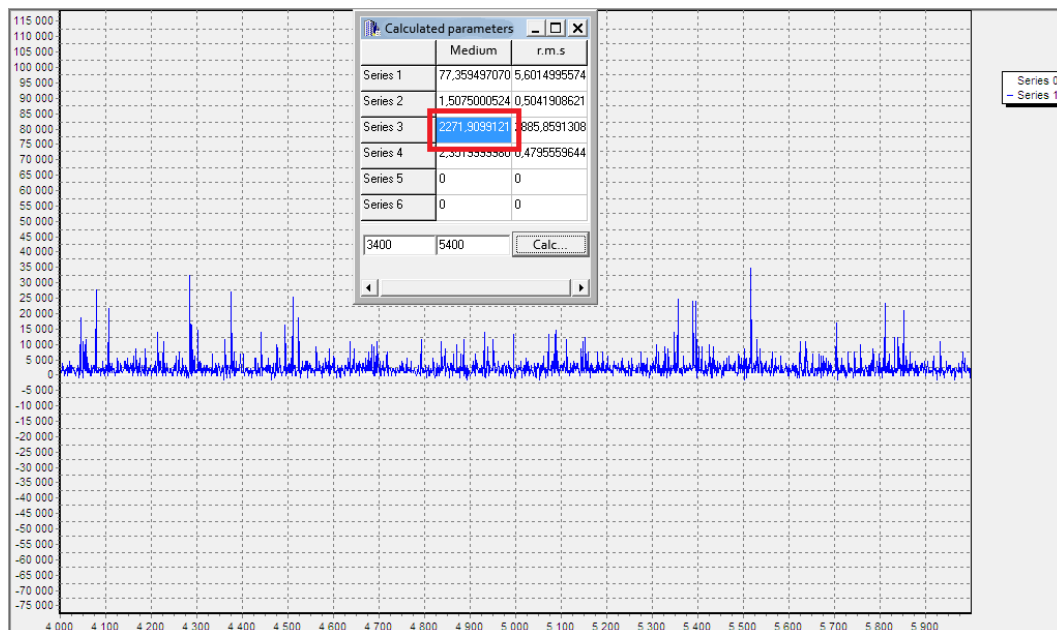


Рисунок 3.35. Осцилограма сил різання ґрунту IV категорії при куті напрямку сил різання $\alpha = 60^\circ$

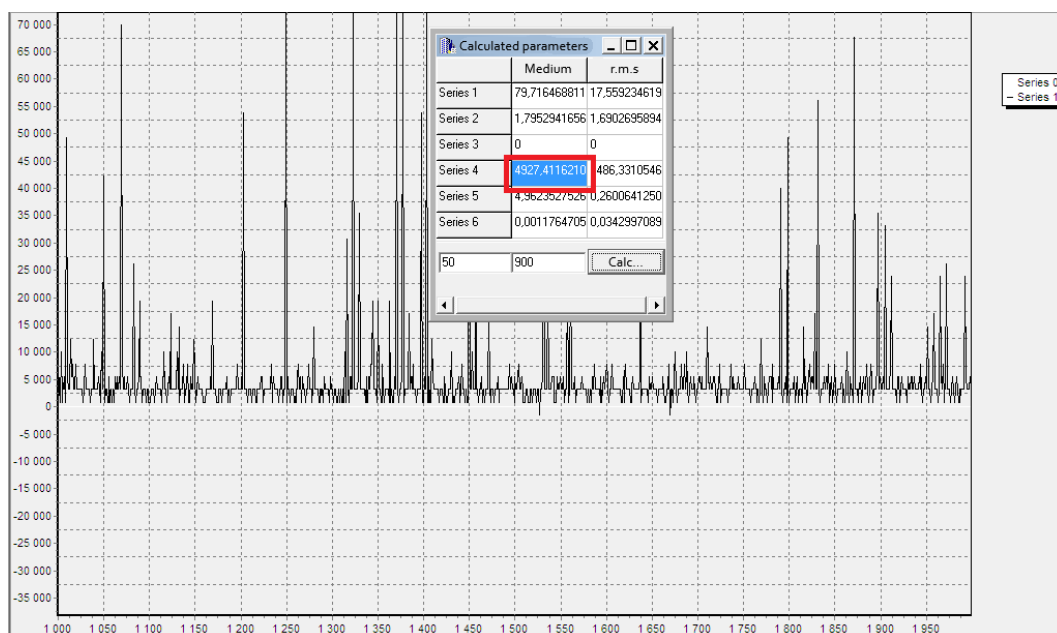


Рисунок 3.36. Осцилограма сил різання ґрунту V категорії при куті напрямку сил різання $\alpha = 60^\circ$

Надалі осцилограми були оброблені за допомогою сучасного програмного забезпечення Tenzo Cut, що дозволило усунути трудомісткий процес обробки даних. Це мінімізувало кількість вимірювань зусилля різання при заданій точності та надійності результатів випробувань, з надійністю даних від 0,90 до 0,95.

Отримані осцилограми були приведені до початку горизонтальної координатної осі шляхом зсуву найнижчого значення до нульової позначки та програмно перетворені на значення зусилля N (тарування).

Після тарування осцилограм, було визначено середнє значення зусиль різання за допомогою програмного розрахункового модуля.

Попередньо встановивши діапазон на тарованій осцилограмі, було задано початкову та кінцеву позначки на горизонтальній координатній осі. Результати розрахунків представлені в таблиці 3.15.

Таблиця 3.15. Сили різання, визначені експериментально

α	Сила різання ґрунту P , кН		
	Експериментальні дані		
	Суглинок	Мергелиста глина	Аргіліт
0°	0,919	3,091	9,092
20°	0,951	3,072	9,632
40°	0,949	2,853	10,734
60°	0,608	2,271	4,927
80°	0,518	1,841	4,627

Графічне відображення даних, отриманих після експериментальних досліджень (рис. 3.37).

Для перевірки адекватності результатів теоретичних розрахунків було проведено порівняльний аналіз параметрів, з даними визначених експериментально.

Значення зусиль різання, які виконують роботу руйнування та подолання опору ґрунту різанню і були визначені теоретично (з урахуванням коефіцієнтів подібності, що використовуються при фізичному моделюванні для вищезгаданого лабораторного стенда для реєстрації зусиль різання просторово орієнтованим ножем), порівнюються з результатами сил різання, визначеними експериментально на цьому стенді (рис. 3.38)

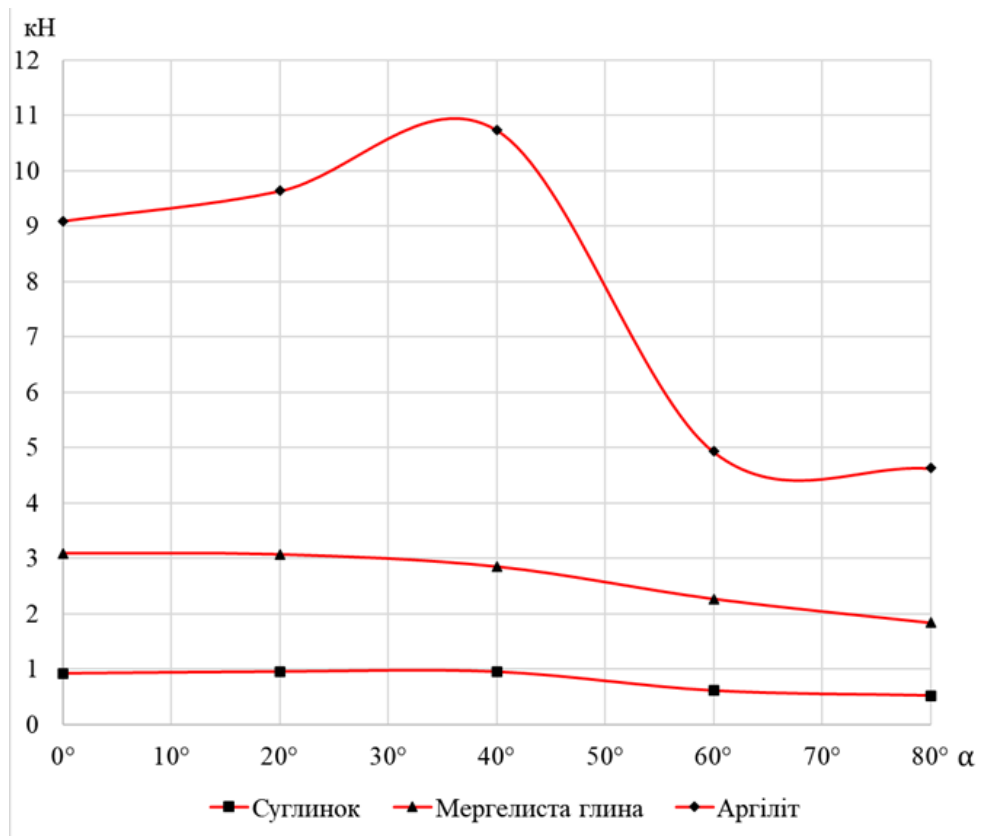


Рисунок 3.37. Графік сил різання на основі експериментальних даних

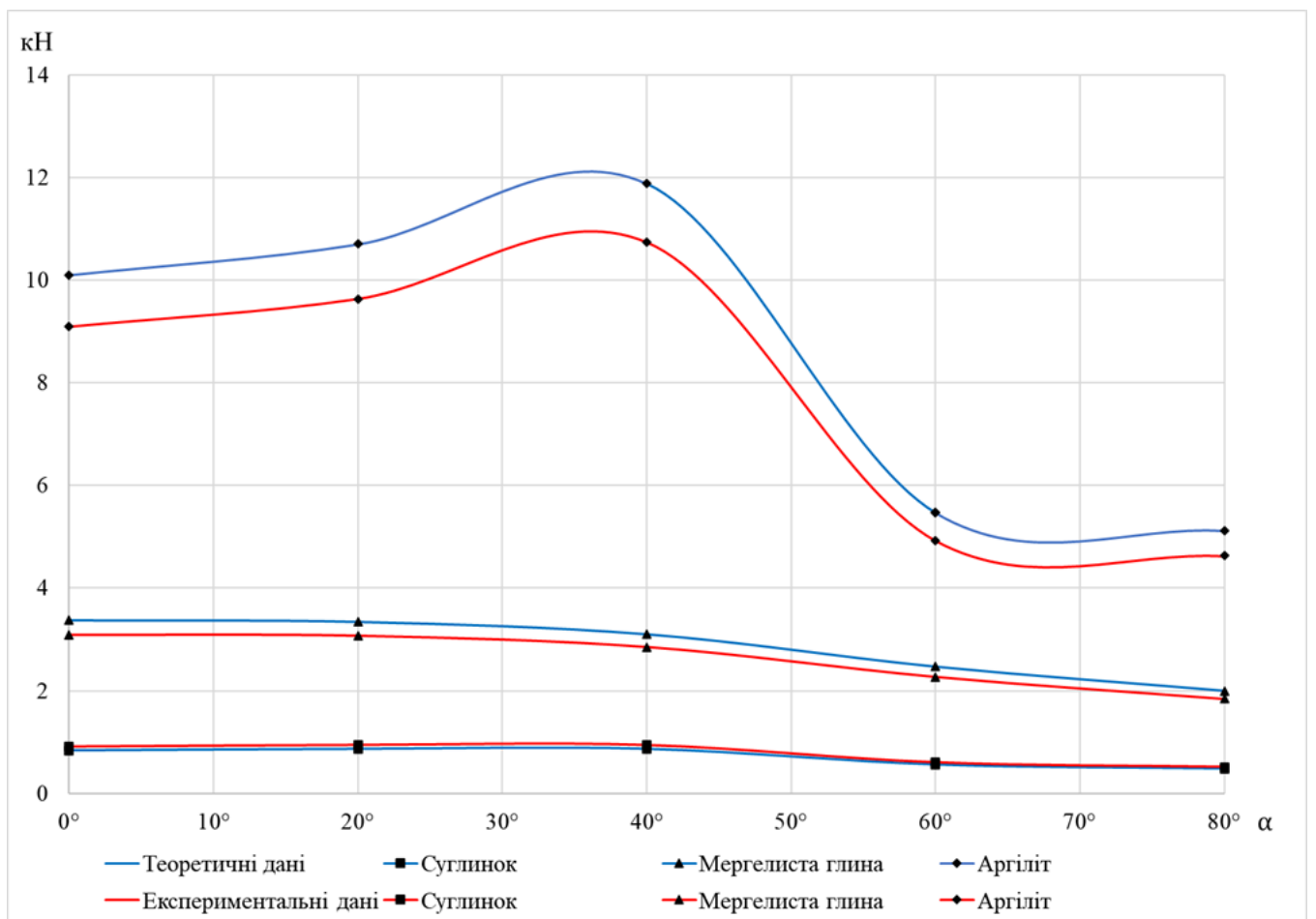


Рисунок 3.38. Зведений графік теоретичних та експериментальних сил різання

Точність визначення сили різання, отриманого теоретичним та експериментальним методами, визначається залежністю:

$$\Delta_{\delta} = \frac{|\delta_E - \delta_T|}{\delta_E} \cdot 100\% . \quad (3.18)$$

Де δ_E – значення сили різання, отримане експериментально; δ_T – значення сили різання, отримане теоретично.

Максимальне значення похибки у визначенні зусилля різання теоретичним та експериментальним методами на лабораторному стенді для реєстрації зусиль різання просторово-орієнтованим ножом відвального обладнання становить $\Delta_{\delta}=10,06\%$.

Внаслідок експериментальних досліджень було визначено значення зусилля різання робочого середовища при різних значеннях кута напрямку зусилля різання α робочим інструментом. Порівняння теоретичних та експериментальних результатів визначення зусилля різання показало їх достатню збіжність і, відповідно, правомірність використання аналітичних виразів при розрахунках силових параметрів машин із просторово-орієнтованим ножом відвального обладнання [107].

Висновки по розділу 3

1. Було створено програму та визначено об'єкт експериментальних досліджень.
2. На основі теорії подібності були визначені коефіцієнти подібності, які були використані для розрахунку геометричних та кінематичних параметрів лабораторних експериментів. Це дозволило спроектувати та виготовити лабораторне обладнання.
3. Отримані значення коефіцієнтів подібності дали можливість побудувати фізичну модель установки для різання ґрунтів просторово орієнтованим ножом відвалу бульдозера, що подібна натурній установці для різання ґрунтів просторово орієнтованим ножом відвалу бульдозера.

єнтованим ножем відвалу бульдозера. В якості фізичної моделі установки з врахуванням коефіцієнтів подібності та передбачених задач досліджень було доопрацьовано динамометричний стенд реєстрації силового навантаження авторської конструкції КНУБА для дослідження процесу різання ґрунтів просторово орієнтованим ножем відвалу бульдозера, що дозволяє провести повноцінні експериментальні дослідження з врахуванням всіх чинних факторів взаємодії робочого середовища та робочого органу під час різання. В якості робочого середовища запропоновано використання парафін, а в якості робочого органу – сталю модель просторово орієнтованого ножа. Створення 3D моделі випробувальної установки дає можливість зрозуміти масштаб та порядок створення реальної зменшеної в масштабі моделі просторово орієнтованого ножа бульдозера та механізм переміщення, і це дає можливість легкої перебудови її в CAD програмі що забезпечує пришвидшення створення реального випробувального стенду. Створення реальної зменшеної в масштабі моделі виконувалось у відповідності до коефіцієнтів подібності і проведений її комп'ютерний аналіз навантажень, дає розуміння того що дослідний робочий орган має правильну параметризацію що виражено в коефіцієнтах запасу по межі текучості, та міцності, і коефіцієнту запасу втрати стійкості.

4. Розроблено високоточну систему керування подачею робочого органу та високотехнологічну вимірювальну та реєструючу апаратуру, що дозволяє швидко та без повторень з первинних даних отримувати достатньо точні з відносним відхиленням $\Delta x=0,1$ оцінки взаємодії робочого середовища з просторово орієнтованим ножем бульдозерного відвалу та дало змогу обробляти їх за допомогою сучасного програмного забезпечення, що виключило трудомісткий процес обробки даних. Це дозволило мінімізувати кількість вимірювань сили різання при заданій точності та достовірності експериментальних результатів з достовірністю отриманих даних від 0,90 до 0,95.

5. Проведені експериментальні дослідження в повній мірі підтверджують адекватність теоретичних розрахунків, а порівняння теоретичних та експериментальних результатів визначення сили різання показало їх достатню збіжність і, відповідно, правомірність використання аналітичних виразів при розрахунку силових па-

раметрів машин з просторово орієнтованими ножами відвального обладнання. Величини сили різання, що виконують роботу по руйнуванню і подоланню опору ґрунту різанню, що визначались теоретичним шляхом із врахуванням коефіцієнтів подібності, використаних при фізичному моделюванні для наведеного лабораторного стенда реєстрації сил різання просторово орієнтованими ножами відвального обладнання, порівняно з результатами сили різання, визначених експериментальним шляхом на даному стенді. Максимальне значення похибки визначення сили різання теоретичним та експериментальним шляхом на лабораторному стенді реєстрації сил різання просторово орієнтованими ножами відвального обладнання становить $\Delta_{\delta}=10,06\%$.

Основні наукові результати по даному розділу опубліковані у працях [75, 82, 83, 87, 88, 99 , 104, 107]

РОЗДІЛ 4. ПРОДУКТИВНІСТЬ ТА ЕНЕРГОЄМНІСТЬ РОЗРОБКИ ҐРУНТІВ ПРИ ВИКОРИСТАННІ РУХОМИХ ПРОСТОРОВО ОРІЄНТОВАНИХ НОЖІВ ВІДВАЛУ ЗЕМЛЕРИЙНИХ МАШИН

У розділі досліджено загальний опір та його складові, що виникають під час роботи бульдозера в ґрунтовому середовищі та процесів у призмі волочіння.

Цей загальний опір є сукупністю кількох окремих сил: опору необхідного для розрізання робочого середовища; опору від волочіння призми ґрунту перед відвалом; опору, що виникає при русі ґрунту вгору по поверхні відвалу; опору руху самого бульдозера; а також тертя відвалу об ґрунт.

Результатом дослідження являється демонстрація того, що використання рухомих просторово орієнтованих ножів на відвалі значно зменшує необхідну силу різання.

Розрахунки та графіки підтверджують, що чим більше змінюється кут α прикладання сили різання, тим легше зрізається ґрунт. Це зменшення опору різанню безпосередньо позитивно впливає на стійкість машини під час роботи, що є важливим фактором в умовах експлуатації.

Також було досліджено ключові показники ефективності роботи землерийної машини, а саме продуктивності, що вимірюється в обсягах переміщеного ґрунту за одиницю часу, та енергоємності, кількості енергії, необхідної для виконання одиниці роботи. У важких ґрунтах високий опір змушує бульдозер зрізати тонші шари, що знижує об'єм ґрунту, який може бути переміщений за один цикл, і збільшує загальну тривалість робочого циклу.

Однак, завдяки зменшенню сили різання, досягнутому за допомогою рухомих просторово орієнтованих ножів, бульдозер може розвивати вищу робочу швидкість. Це призводить до значного збільшення загальної продуктивності машини і до зниження питомої витрати енергії на одиницю виконаного обсягу роботи. Оптимізація цих двох показників є основним завданням для максимізації вигоди та зниження експлуатаційних витрат у будівельній та гірничодобувній галузях.

4.1 Визначення сили різання ґрунту відвалом при роботі землерийних машин з рухомими просторово орієнтованими ножами

Загальний опір відвалу бульдозера W (кН) при різанні і переміщенні ґрунту на горизонтальній поверхні визначається сумою опорів різанню W_1 ; переміщенню призми волочіння W_2 ; переміщенню ґрунту вгору по відвалу W_3 ; переміщенню бульдозера по горизонталі або на ухилі (підйомі) W_4 і тертю відвалу бульдозера по ґрунту W_5 і обчислюється з співвідношення [108]:

$$W = \sum_i W_i = W_1 + W_2 + W_3 + W_4 + W_5, \quad (4.1)$$

W_1 - опір різанню робочого середовища, (кН):

$$W_1 = K_1 B_o h \cdot 10^3, \quad (4.2)$$

K_1 - питомий опір різанню ($K_1 = 0,06; 0,09; 0,12; 0,15$ - для I, II, III і IV-V категорії ґрунту відповідно) (МПа); B_o - довжина ножа, (м); h - товщина шару, що зрізається (м),

W_2 - опір волочіння ґрунтової призми попереду ножа, (кН):

$$W_2 = g Q_v \gamma \mu_2, \quad (4.3)$$

W_3 - опір руху ґрунту вгору по відвалу, (кН):

$$W_3 = g Q_v \gamma \mu_1 \cos^2 \delta_o, \quad (4.4)$$

Опір тертя бульдозерного відвалу об ґрунт W_4 (кН):

$$W_4 = g K_e t_e \mu_1, \quad (4.5)$$

Q_v - об'єм призми волочіння; μ_1 - коефіцієнт тертя ґрунту по поверхні леза ($\mu_2 = 0,7...0,8; 0,6...0,7; 0,5...0,6; 0,1...0,4$ відповідно для ґрунтів I, II, III, IV-V категорій); γ - щільність ґрунту, т/м³; μ_2 - коефіцієнт тертя ґрунту по ґрунту ($\mu_1 = 0,49...0,65; 0,25...0,53; 0,18...0,47; 0,11... 0,40$ відповідно для ґрунтів I, II, III, IV категорій); δ_o - ухил робочого шляху бульдозера; g - прискорення вільного падіння, м/с²; K_e - кое-

фіцієнт, що враховує частину маси обладнання, яка припадає на тертя об ґрунт, $K_e = 0,5 \dots 0,8$; m_e - маса бульдозерного обладнання, т.

Опір руху бульдозера W_5 , (кН):

$$W_5 = gG\omega_o, \quad (4.6)$$

де g - прискорення вільного падіння, м/с²; G - вага бульдозера, т; ω_o - питомий опір руху бульдозера ($\omega_o = 0,2; 0,18; 0,16; 0,14$ для I, II, III і IV-V відповідно).

Об'єм призми волочіння за стандартом SAE J1265 [119]:

$$Q_v = 0,8 \cdot B_o \cdot H_o. \quad (4.7)$$

Де:

B_o – ширина (довжина) відвалу, м.

H_o – висота відвалу, м.

При роботі бульдозером з поворотним відвалом і встановленням його під кутом загальний опір буде меншим, ніж при роботі з нерухомим відвалом [120, 121, 122, 123].

Коефіцієнт тертя між ґрунтом і сталлю μ_1 залежить від типу і стану ґрунту, а також стану поверхні сталі і становить $0,25 \dots 1,0$, зменшуючись зі збільшенням вологості і ступеня порушення структури ґрунту. Між коефіцієнтами μ_1 і μ_2 існує зв'язок, який визначається відношенням $\mu_1 \approx 0,75 \cdot \mu_2$, де μ_2 - коефіцієнт внутрішнього тертя ґрунту, $\mu_2 = 0,58 \dots 1,1$.

Коефіцієнт опору копанню K_1 для м'якого і щільного ґрунту, відносна щільність якого може бути охарактеризована числом ударів C густиноміра, рекомендується визначати із співвідношення:

$$K_1 = 0,16 + 0,1C. \quad (4.8)$$

Всі групи ґрунтів поділяються на вісім категорій, включаючи немерзлі (категорії I - IV) і мерзлі (категорії V - VIII) ґрунти. Ґрунти I - IV категорій розробляються звичайною землерийною технікою. Ґрунти V - VIII категорій більш міцні і при

великій глибині промерзання розробляються після попереднього механічного або вибухового розпушування.

Для щільних і напівскельних ґрунтів, а також для кам'яного вугілля і міцних мерзлих порід коефіцієнт опору копанню K_1 слід визначати з урахуванням конкретних структурно-міцнісних характеристик ґрунту в масиві.

Номінальне тягове зусилля бульдозера:

$$P_{зч} = 9,81 \cdot U_{fr} \cdot G_{fr}. \quad (4.11)$$

де U_{fr} – коефіцієнт щеплення базової машини (табл. 4.2) з бульдозерним та розпушувальним обладнанням, що відповідає допустимому заносу та тяговому ККД; G_{fr} - зчіпна маса бульдозера в робочому стані.

Таблиця 4.2. Значення коефіцієнта тертя U_{fr} залежно від дорожнього покриття

Матеріал покриття	Пневматичні колеса		Гусениці
	Низьким тиском	Високим тиском	
Бетон	0,9	0,8	0,45
Глина, суглинок, земля (суха і щільна)	0,05 – 0,58	0,45 – 0,5	0,9
Глина, суглинок, земля (вологі)	0,4 – 0,49	0,35 – 0,43	–
Розпушена земля	0,4 – 0,5	0,35 – 0,45	0,6
Розпушений пісок	0,2 – 0,35	0,18 – 0,3	0,3
Кар'єрні дороги	0,6 – 0,7	0,55 – 0,63	–
Гравійна дорога	0,36	0,3	–
Ущільнений сніг, лід	0,2 – 0,12	0,15; 0,1	0,12

Середній статичний тиск бульдозера:

$$q_p = \frac{G_B}{2L_{sup}}, \quad (4.12)$$

де G_B - експлуатаційна маса машини; L_{sup} - довжина опорної поверхні гусениці з урахуванням ґрунтових захоплювачів; b - ширина гусениці.

Тягове зусилля рушія по потужності, що в спроможі розвинути трактор P_T , кН:

$$P_m = 3,6 \frac{N}{V} \eta. \quad (4.13)$$

де $N_{\text{дв}}$ – ефективна потужність двигуна, кВт; $\eta = 0,8$ – ККД трансмісії і ходового обладнання машини; V – швидкість руху бульдозера.

Умова руху без буксування:

$$P_{\text{зч}} \geq P_m \geq \sum_i W_i. \quad (4.14)$$

Провівши розрахунок отримали наступні показники, які занесено до таблиці 4.1 та графічно відображено на рисунку 4.1.

Таблиця 4.1. Сили різання відвалом бульдозера шириною 4м

Глибина різання, см	Сила різання, кН			
	P_v	$P_{н1}$ при $\alpha = 90^\circ$	$P_{н2}$ при $\alpha = 45^\circ$	$P_{н3}$ при $\alpha \approx 0^\circ$
5	24	9	13	18
10	48	19	27	38
15	72	30	43	61
20	96	38	61	76
25	120	50	79	101
30	144	52	99	112
35	168	65	120	130

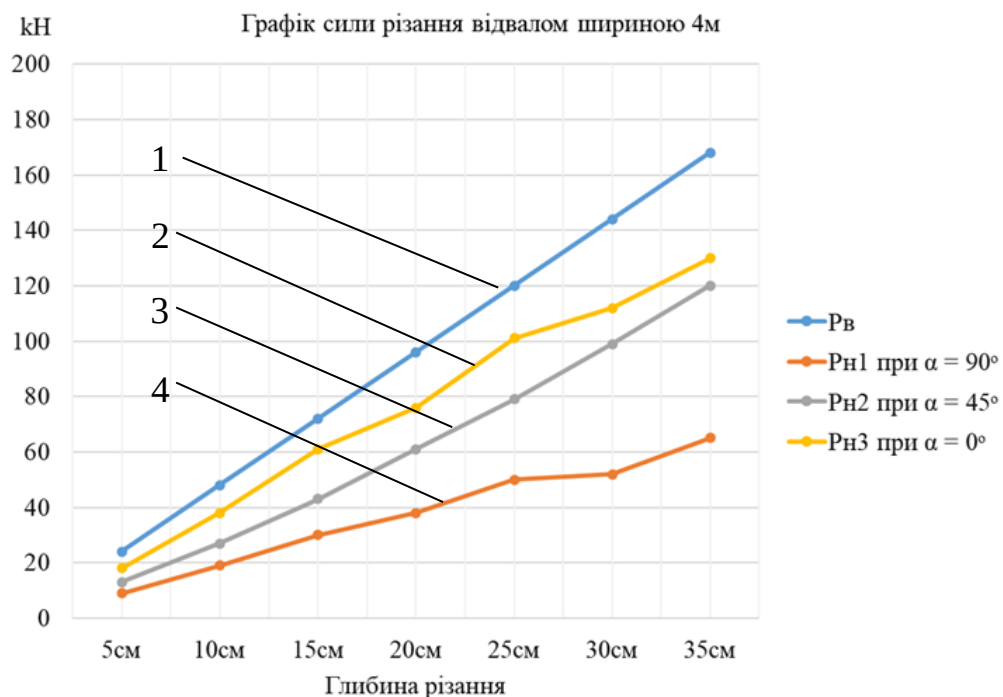


Рис. 4.1. Графік сил різання ґрунту

P_6 - сила різання ґрунту ножем відвалу бульдозера, а також три сили різання ґрунту P_n , з використанням рухомих просторово орієнтованих ножів на відвалі землерийної техніки, під різними кутами α , які показують, наскільки легше зрізати ґрунт при використанні просторово орієнтованих ножів.

Розрахунок різання ґрунту проводився для бульдозера з розміром відвалу $B_0 = 4\text{м}$. На графіку показано:

1 – різання ґрунту відвалом без просторово орієнтованих ножів, на глибину від 5 до 35 см.

2 – різання ґрунту відвалом з просторово орієнтованими ножем, на глибині від 5 до 35 см і кутом сили різання $\alpha = 0^\circ$.

3 – різання ґрунту відвалом з просторово орієнтованими ножами, на глибину різання від 5 до 35 см і кутом різання $\alpha = 45^\circ$.

4 – різання ґрунту відвалом з просторово орієнтованими ножами, на глибину різання від 5 до 35 см і кутом сили різання $\alpha = 90^\circ$.

На графіку (рис. 4.1) чітко видно вплив просторово орієнтованих ножів на силу різання ґрунтів, а саме її зменшення зі збільшенням кута прикладання сили різання α .

Також варто зазначити, що опір ґрунтів різанню, безпосередньо впливає на положення центру тиску, тобто точки, в якій проявляються всі реакції ґрунту на гусениці бульдозера, визначається для різних випадків, які можуть виникнути в умовах експлуатації. Зміщення центру тиску не повинно призводити до того, що передній або задній край гусениці або колеса машини можуть зійти з опорної поверхні.

На бульдозер діє система зовнішніх сил: вертикальна реакція породи на відвал R_0 ; опір різанню ґрунту W_1 ; вертикальні реакції R_A і R_B на краях відвалу; сила зчеплення з поверхнею $F_{fr} = Q_{fr} \cdot U$; вага базової машини G_B . У системі також діють внутрішні сили: S - зусилля на гідроциліндри; N_R і P_R - вертикальна і горизонтальна реакції в штирях O_1 штовхаючої рами відповідно. Ψ - коефіцієнт стійкості ребер А і В відповідно

$$\psi_A = \frac{(G_B l_2)}{(W_1 r + 2 S l_2)}, \quad (4.9)$$

$$\psi_B = \frac{(G_B l_1)}{(2 S l_2 - 2 P_o r)} = \frac{(G_B l_1)}{(2 S l_2 - W_1 r)}. \quad (4.10)$$

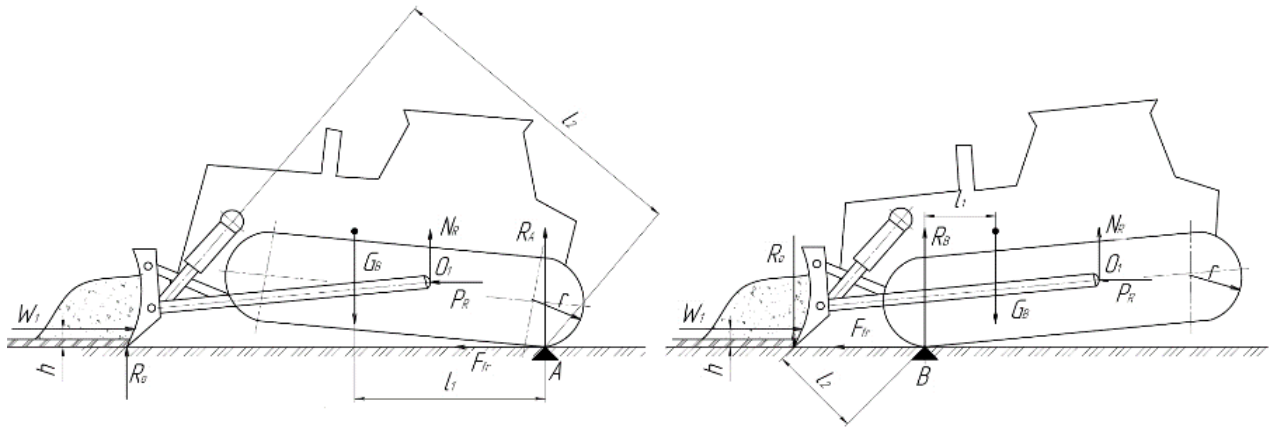


Рисунок 4.2. Схема сил, що діють на бульдозер при розрахунку на перекидання

Так як було обчислено раніше, що при використанні просторово орієнтованих ножів сила різання ґрунту зменшується. Тому це безпосередньо вплине на стійкість бульдозера. При використанні бульдозерів відповідно до робочої гіпотези, по графікам чітко відслідковується тенденція, що при збільшенні відхилення кута прикладання повної сили різання α на просторово орієнтованих ножах, сила різання ґрунту істотно зменшується.

4.2. Продуктивність та енергоємність землерийних машин з просторово орієнтованими ножами

Для будівельної та гірничодобувної галузей продуктивність та енергоємність бульдозера є ключовими показниками. Продуктивність бульдозера визначається обсягом ґрунту або матеріалу, який машина може перемістити за одиницю часу, і залежить від потужності двигуна, конструкції відвалу та майстерності оператора.

Водночас енергоємність – це кількість енергії, яка необхідна для виконання одиниці роботи, і вона має вирішальне значення для зниження експлуатаційних ви-

трат. Створення високої продуктивності та низької енергоємності є основним завданням щоб максимізувати вигоду від роботи техніки.

Продуктивність бульдозера залежить від багатьох факторів, вимірюється в м³/год і розраховується за формулою:

$$C = \frac{Q_v}{T_{\text{ц}}} * k_{\text{ч}}, \quad (4.15)$$

де, Q_v – об'єм ґрунту, що переміщується за один цикл, м³;

$k_{\text{ч}}$ – коефіцієнт використання за часом;

$T_{\text{ц}}$ – тривалість циклу, год.

Опір ґрунту впливає на обидва основні параметри цієї формули: об'єм призми волочіння Q_v та тривалість циклу $T_{\text{ц}}$.

Обсяг ґрунту, який бульдозер може перемістити, залежить від його тягового зусилля, яке має долати суму всіх опорів. Опір ґрунтів різанню є головним елементом, що протидіє руху. Коли бульдозер працює у ґрунтах з високим опором такі як, тверді суглинки, глини, мерзлі ґрунти, він вимушений різати тонший шар ґрунту. Зменшення товщини зрізаного шару призводить до зменшення коефіцієнта наповнення відвалу $k_{\text{н}}$ та, відповідно, зменшення фактичного обсягу ґрунту Q_v , який машина може перемістити за один раз.

В свою чергу опір ґрунту також впливає на тривалість робочого циклу $T_{\text{ц}}$, як було зазначено раніше, високий опір вимагає зрізання тоншого шару. Для набору необхідного обсягу Q_v бульдозеру потрібно пройти більшу відстань різання $L_{\text{різ}}$, що призводить до зростання часу $T_{\text{різ}}$.

Також опір ґрунту призводить до зниження швидкості робочого ходу $V_{\text{роб}}$, так як при роботі у важких ґрунтах, тертя ґрунту об відвал, опір коченню зростає.

Але як показав розрахунок сили різання відвалом з рухомими просторово орієнтованими ножами, що бульдозеру при тих самих геометричних параметрах потрібно менше зусилля, щоб зрізати ґрунт на тій самій глибині що і без застосування просторово орієнтованих ножів.

Тривалість одного повного циклу розраховується як сума часу, витраченого на основні та допоміжні дії:

$$T_{\text{ц}} = T_{\text{роб}} + T_{\text{хх}} + T_{\text{доп}}, \quad (4.16)$$

Де:

$T_{\text{ц}}$ – тривалість повного робочого циклу, хв.

$T_{\text{роб}}$ – час робочого ходу (різання ґрунту, переміщення та розвантаження), хв.

$T_{\text{хх}}$ – час холостого ходу, хв.

Тривалість робочого ходу $T_{\text{роб}}$, бульдозер витрачає на те, щоб заповнити відвал ґрунтом, перевезти його до місця розвантаження, хв.

$$T_{\text{роб}} = \frac{L_{\text{роб}}}{V_{\text{роб}}}, \quad (4.17)$$

Де:

$L_{\text{роб}}$ – середня відстань транспортування ґрунту (від центру різання до центру розвантаження), м.

$V_{\text{роб}}$ – середня швидкість бульдозера на робочому ході, м/хв.

$$V_{\text{роб}} = \frac{N_{\text{дв}}}{P_{\text{різ}}}, \quad (4.18)$$

Таблиця 4.3. Робоча швидкість бульдозера

Глибина різання, см	Швидкість бульдозера, м/хв			
	$V_{\text{в}}$	V1 при $\alpha \approx 90^\circ$	V2 при $\alpha = 45^\circ$	V3 при $\alpha \approx 0^\circ$
5	15	39	27	20
10	8	19	13	10
15	5	12	8	6
20	4	10	6	5
25	3	7,5	5	4
30	2,5	7	4	3
35	2	6	3	2

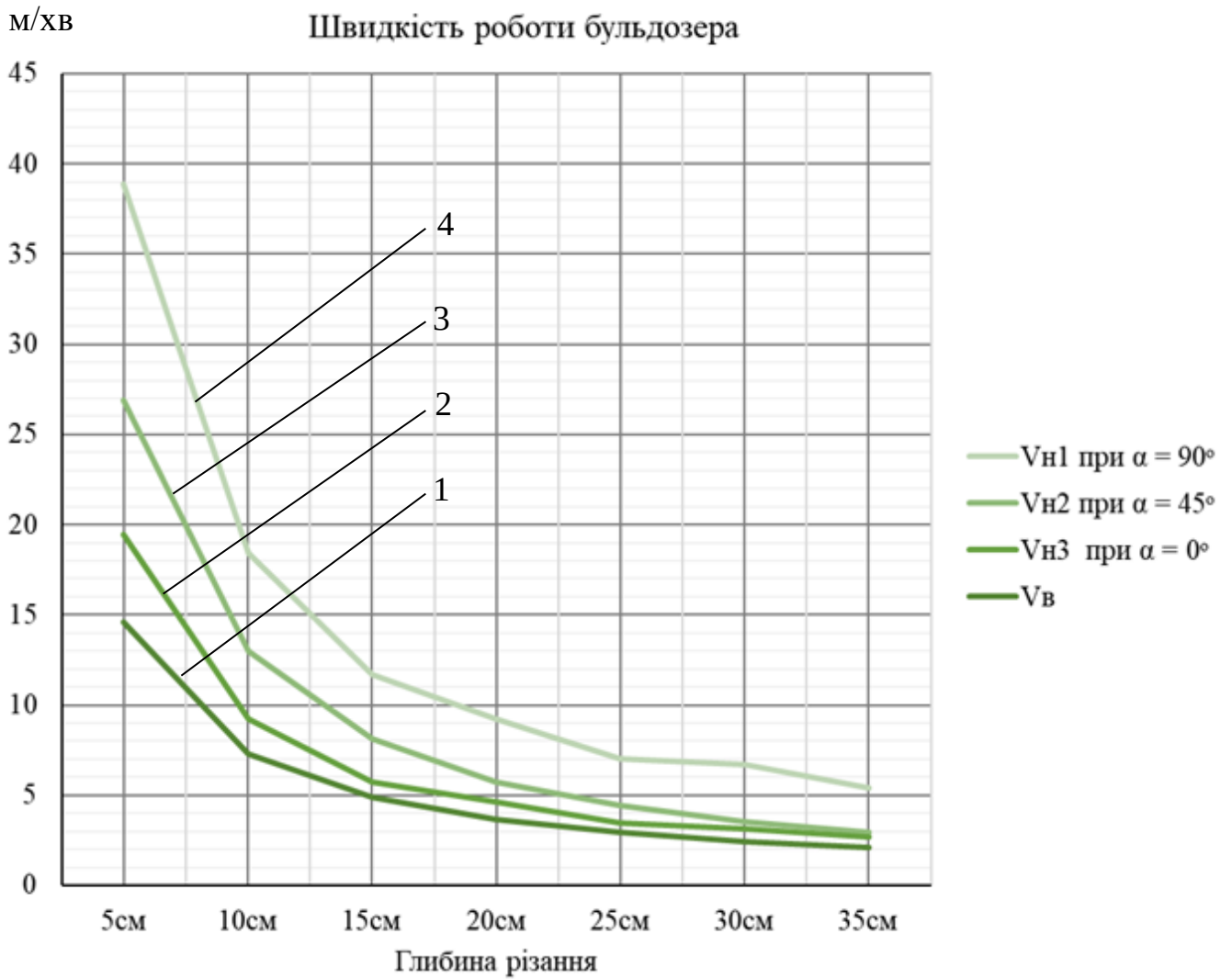


Рисунок 4.3. Графіки зміни робочої швидкості бульдозера

1 – робоча швидкість бульдозера, при різанні ґрунту відвалом без просторово орієнтованих ножів, на глибину від 5 до 35 см.

2 – робоча швидкість бульдозера, різанні ґрунту відвалом з просторово орієнтованими ножем, на глибині від 5 до 35 см і кутом сили різання $\alpha = 0^\circ$.

3 – робоча швидкість бульдозера, різанні ґрунту відвалом з просторово орієнтованими ножами, на глибину різання від 5 до 35 см і кутом різання $\alpha = 45^\circ$.

4 – робоча швидкість бульдозера, різанні ґрунту відвалом з просторово орієнтованими ножами, на глибину різання від 5 до 35 см і кутом сили різання $\alpha = 90^\circ$.

V_v – робоча швидкість бульдозера, без використання рухомих просторово орієнтованих ножів, а також три робочі швидкості $V_{нi}$, з використанням рухомих просторово орієнтованих ножів на відвалі землерийної техніки, під різними кутами α , які

показують, наскільки швидше буде рухатись бульдозер, при різанні ґрунту з використанням просторово орієнтованих ножів.

Тривалість холостого ходу T_{xx} , це час, який витрачається на повернення машини на вихідну позицію для початку нового циклу, хв.

$$T_{xx} = \frac{L_{xx}}{V_{xx}} \quad (4.19)$$

Де:

L_{xx} – відстань холостого ходу (зазвичай приймається рівною $L_{роб}$), м.

V_{xx} – середня швидкість бульдозера на холостому ході, м/хв.

Час $T_{дон}$ зазвичай приймається за нормативами або емпіричними даними, оскільки його точне вимірювання складне. Залежно від класу бульдозера, типу трансмісії (механічна, гідромеханічна) та умов роботи, $T_{дон}$ може становити приблизно 0,2 – 0,5 хвилини на цикл.

Якщо підставити формули для $T_{роб}$ і T_{xx} у загальну формулу, отримаємо:

$$T_{ц} = \left(\frac{L_{роб}}{V_{роб}} + \frac{L_{xx}}{V_{xx}} \right) + T_{дон} \quad (4.20)$$

Відстань робочого ходу $L_{роб}$ – це загальна довжина шляху, який проходить бульдозер, здійснюючи різання ґрунту, його транспортування та розвантаження.

$L_{роб}$ складається з трьох основних елементів:

$$L_{роб} = L_{різ} + L_{транс} + L_{розв} \quad (4.21)$$

Де:

$L_{різ}$ – довжина шляху різання (набору) ґрунту, м.

$L_{транс}$ – довжина шляху транспортування (переміщення) ґрунту, м.

$L_{розв}$ – довжина шляху розвантаження (розрівнювання), м.

Довжина різання $L_{різ}$ – це відстань, яку бульдозер проходить, щоб набрати в призму перед відвалом необхідний (розрахунковий) обсяг ґрунту.

Вона визначається, виходячи з об'єму призми волочіння Q_v , який може вмістити відвал, та площі поперечного перерізу F зрізаної стружки. Якщо бульдозер працює

пошарово (знімає ґрунт з певної товщини), $L_{різ}$ буде дорівнювати довжині ділянки, яку потрібно зрізати, щоб наповнити відвал

$$L_{різ} = \frac{Q_v}{F} \quad (4.22)$$

Q_v – об'єм призми волочіння, m^3 .

F – площа перерізу стружки, яку зрізає бульдозер (залежить від товщини шару, що зрізається h та ширини відвалу B_0), m^2 .

$L_{транс}$ – це ключова частина $L_{роб}$. Це відстань, на яку потрібно перемістити ґрунт.

Довжина транспортування $L_{транс}$, визначається на плані ділянки як середня відстань по прямій між центром ваги обсягу ґрунту, який зрізається, та центром ваги обсягу ґрунту, який підсипається. Ця відстань є проектною і залежить від конфігурації ділянки та обсягів земляних робіт.

Зазвичай $L_{транс}$ вказують у нормативних таблицях як найбільш економічно доцільну для роботи бульдозера, в залежності від потужності машини та типу ґрунту.

$L_{розв}$ – це довжина шляху, який бульдозер проходить для повного розрівнювання ґрунту або формування насипу. Ця величина, як правило, є малою і часто приймається сталою, наприклад, $L_{розв} \approx 2-5$ м, або її включають в $L_{транс}$.

Таблиця 4.4. Продуктивність бульдозера

Глибина різання, см	Продуктивність бульдозера, $m^3/год$			
	C_v	C1 при $\alpha \approx 90^\circ$	C2 при $\alpha = 45^\circ$	C3 при $\alpha = 0^\circ$
5	102,4	215,9	166,6	129,6
10	84,2	185,2	139,1	103,7
15	70,2	153	112	81,8
20	59,9	139,2	91,3	74,5
25	52,2	117,4	77,4	61,5
30	46,2	119,3	66	58,7
35	51,5	101,3	57,2	53

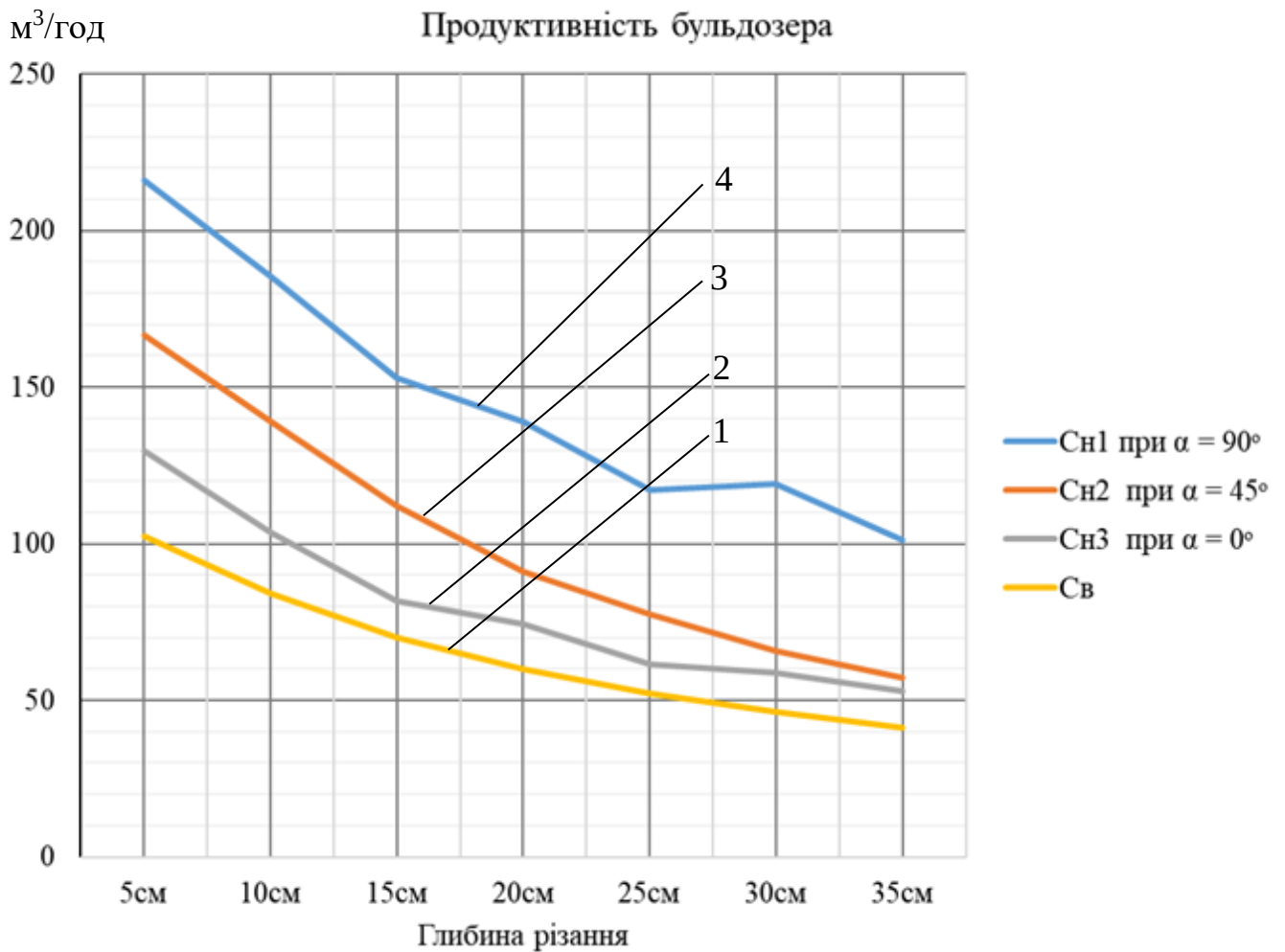


Рисунок 4.4. Графіки зміни продуктивності роботи бульдозера

1 – продуктивність бульдозера, при різанні ґрунту відвалом без просторово орієнтованих ножів, на глибину від 5 до 35 см.

2 – продуктивність бульдозера, різанні ґрунту відвалом з просторово орієнтованими ножем, на глибині від 5 до 35 см і кутом сили різання $\alpha = 0^\circ$.

3 – продуктивність бульдозера, різанні ґрунту відвалом з просторово орієнтованими ножами, на глибину різання від 5 до 35 см і кутом різання $\alpha = 45^\circ$.

4 – продуктивність бульдозера, різанні ґрунту відвалом з просторово орієнтованими ножами, на глибину різання від 5 до 35 см і кутом сили різання $\alpha = 90^\circ$.

C_v – продуктивність бульдозера, без використання рухомих просторово орієнтованих ножів, а також три продуктивність C_n , з використанням рухомих просторово орієнтованих ножів на відвалі землерийної техніки, під різними кутами α , які по-

казують, наскільки продуктивніше працює бульдозер, при різанні ґрунту з використанням просторово орієнтованих ножів.

Оцінка енергоємності роботи бульдозера при його експлуатації з просторово орієнтованими ножами. Являє собою розрахунок спожитої енергії на одиницю виконаного обсягу роботи, а також аналіз ключових факторів, що впливають на цей показник. Точне визначення та аналіз енергоємності їхньої роботи дозволяє не лише оптимізувати витрати, але й оцінити вплив різних технологічних та ґрунтових умов. Та визначається за формулою:

$$E = \frac{N}{C} \quad (4.23)$$

де:

E – енергоємність, кВт·год/м³;

N – потужність, що споживається двигуном під час роботи, кВт;

C – продуктивність бульдозера, м³/год.

Таблиця 4.5. Енергоємність роботи бульдозера

Глибина різання, см	Енергоємність роботи бульдозера, кВт·год/ м ³			
	E_v	E_1 при $\alpha \approx 90^\circ$	E_2 при $\alpha = 45^\circ$	E_3 при $\alpha = 0^\circ$
5	3,42	1,62	2,1	2,7
10	4,15	1,89	2,51	3,37
15	4,99	2,29	3,12	4,28
20	5,84	2,51	3,83	4,69
25	6,71	2,93	4,52	5,69
30	7,58	2,98	5,3	5,96
35	8,45	3,45	6,12	6,6

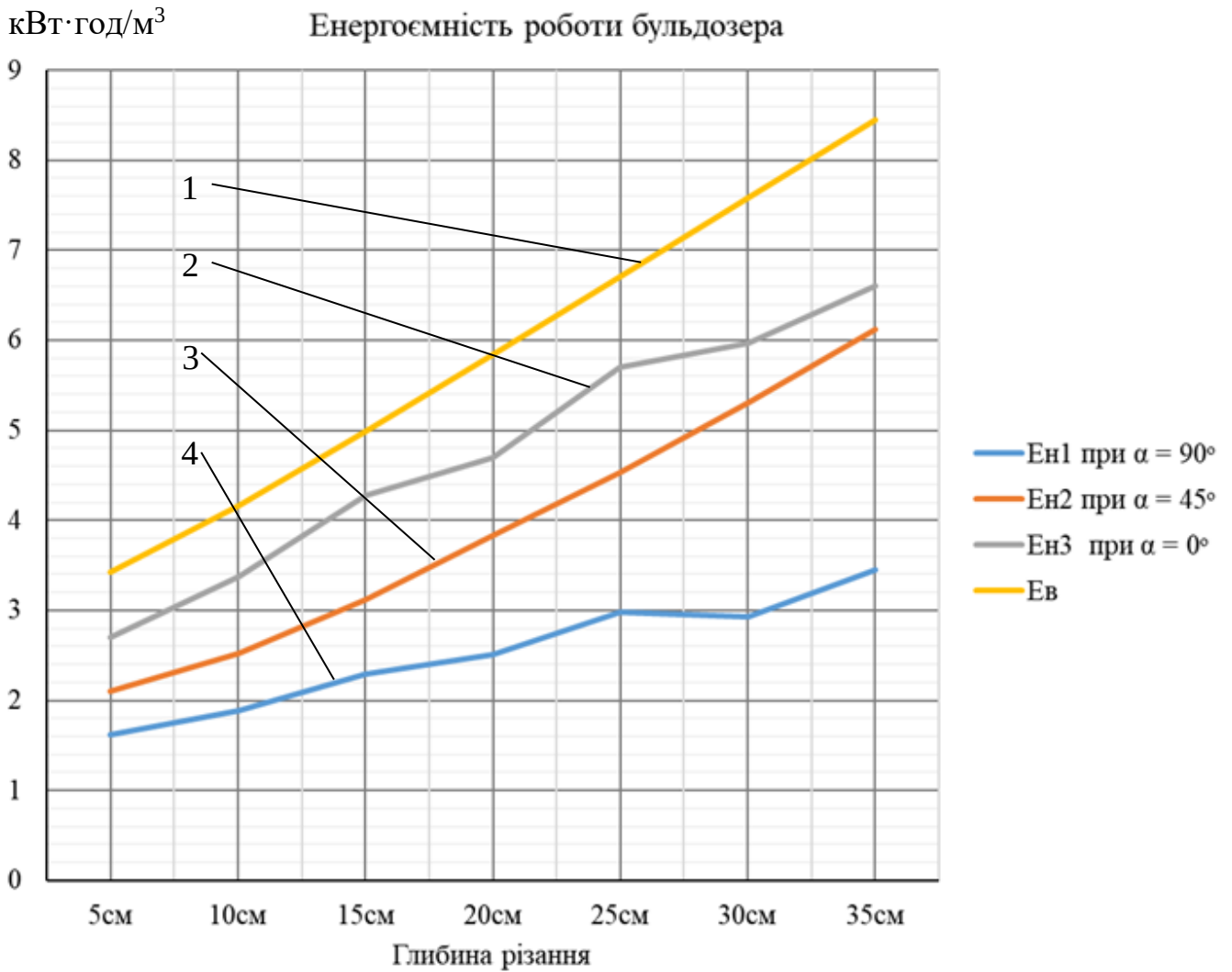


Рисунок 4.5. Графіки зміни енергоємності роботи бульдозера

1 – енергоємність бульдозера, при різанні ґрунту відвалом без просторово орієнтованих ножів, на глибину від 5 до 35 см.

2 – енергоємність бульдозера, різанні ґрунту відвалом з просторово орієнтованими ножем, на глибині від 5 до 35 см і кутом сили різання $\alpha = 0^\circ$.

3 – енергоємність бульдозера, різанні ґрунту відвалом з просторово орієнтованими ножами, на глибину різання від 5 до 35 см і кутом різання $\alpha = 45^\circ$.

4 – енергоємність бульдозера, різанні ґрунту відвалом з просторово орієнтованими ножами, на глибину різання від 5 до 35 см і кутом сили різання $\alpha = 90^\circ$.

E_e – енергоємність бульдозера, без використання рухомих просторово орієнтованих ножів, а також три енергоємності E_n , з використанням рухомих просторово орієнтованих ножів на відвалі землерийної техніки, під різними кутами α , які пока-

зують, наскільки зменшується енергоємність бульдозера, при різанні ґрунту з використанням просторово орієнтованих ножів.

Висновки по розділу 4

1. Подолання загального опору відвалу бульдозера при різанні і переміщенні ґрунту є сумою п'яти основних опорів: різанню, переміщенню призми волочіння, переміщенню ґрунту вгору по відвалу, тертю відвалу по ґрунту і опору руху бульдозера.

2. Використання рухомих просторово орієнтованих ножів на відвалі землерийної техніки призводить до істотного зменшення сили різання ґрунту порівняно з роботою без них. Що чітко прослідковується на графіку сил різання (Рис. 4.1), зменшення сили різання ґрунту корелює зі збільшенням кута прикладання сили різання (α) на просторово орієнтованих ножах (від $\alpha = 0^\circ$ до $\alpha = 90^\circ$).

3. Зменшення сили різання безпосередньо впливає на стійкість бульдозера під час роботи.

4. Застосування просторово орієнтованих ножів призводить до зростання робочої швидкості бульдозера при різанні ґрунту на тій самій глибині порівняно зі швидкістю без них.

5. Збільшення робочої швидкості та зниження опору ґрунтів різанню призводить до зростання продуктивності бульдозера. Чітко відслідковується тенденція, що зі збільшенням кута сили різання (α) продуктивність бульдозера зростає (найвища — при $\alpha \approx 90^\circ$).

6. Енергоємність роботи бульдозера, яка є відношенням потужності, що споживається двигуном, до продуктивності, зменшується при використанні рухомих просторово орієнтованих ножів. Найменша енергоємність роботи бульдозера спостерігається при найбільшому куті сили різання ($\alpha \approx 90^\circ$).

7. Створення високої продуктивності та низької енергоємності за рахунок застосування просторово орієнтованих ножів є основним завданням для максимізації вигоди від роботи землерийної техніки та зниження експлуатаційних витрат.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Дисертація є закінченою науково-дослідною роботою, в якій подано теоретичне узагальнення, та вирішення актуальної науково-прикладної задачі. Аналізу і обґрунтування силових та енергетичних параметрів роботи, рухомих просторово орієнтованих ножів для відвалів землерийної техніки, що знайшло відображення в наступному:

1. Створено аналітичну модель просторово орієнтованих ножів. У процесі дослідження була успішно сформована аналітична модель роботи просторово орієнтованих ножів. Модель базується на робочій гіпотезі, яка стверджує, що при розробці ґрунту на різних швидкостях переміщення базової машини та самого ножа відбувається відхилення вектора прикладання сили різання на кут (α). Саме цей кут (α), який залежить від співвідношення швидкостей, став ключовим параметром для створення як параметричної, так і розрахункової моделі. Створена модель є математичним апаратом, що дозволяє прогнозувати та оцінювати вплив кінематичних параметрів на силу різання, закладаючи теоретичну основу для подальшого конструктивного вдосконалення.

2. Розроблено модель взаємодії просторово орієнтованих ножів із ґрунтом. Дослідження призвело до розробки комплексних моделей взаємодії ножа з ґрунтовым середовищем. Була створена параметрична модель взаємодії, для різних конфігурацій ножів, та різних співвідношень швидкостей. Відповідно до встановленої робочої гіпотези, про відхилення вектора сили різання, розрахункова модель ідентифікувала та описала п'ять основних планів руху просторово орієнтованих ножів відвального обладнання. Ці плани руху охоплюють весь робочий діапазон ножа і чітко корелюють із відхиленням прикладеної сили різання на кут (α). Крім того, знайдено дев'ять основних моделей взаємодії з ґрунтом, що враховують кути повороту в плані, та дозволяють розрахувати зміну геометричної взаємодії ножа з ґрунтом.

3. Встановлено закономірності, та визначити залежності, які характерні при взаємодії просторово орієнтованих ножів із ґрунтом. Головною встановленою закономірністю є те, що використання рухомих просторово орієнтованих ножів призво-

дить до істотного зменшення сили різання ґрунту порівняно з роботою без них. Доведено пряму залежність: зменшення сили різання ґрунту корелює зі збільшенням кута прикладання сили різання (α), на просторово орієнтованих ножах (найбільший ефект спостерігається при ($\alpha \approx 90^\circ$)). Визначено, що це зниження опору не лише підвищує стійкість бульдозера, але й безпосередньо призводить до зростання робочої швидкості машини при різанні на тій самій глибині. Таким чином, ключова залежність полягає в тому, що збільшення кута α веде до зниження енергоємності роботи та зростання продуктивності бульдозера.

4. Запропоновано конструктивні рішення з обґрунтованими параметрами. На основі теоретичних моделей та закономірностей, було розроблено конструктивні рішення для реалізації концепції просторово орієнтованих ножів. Для забезпечення адекватності фізичної моделі оригінальному робочому органу, спочатку було виражено параметри натурного процесу через параметри фізичної моделі та визначено коефіцієнти геометричної та динамічної подібності. Це обґрунтування дозволило спроектувати та виготовити лабораторне обладнання (стенд) і просторово орієнтований експериментальний рухомий ніж з параметрами, що відповідають розрахунковим. Також було проведено вдосконалення динамометричного стенду для точної реєстрації силового навантаження.

5. Розроблено методику та програму лабораторних досліджень. У рамках дослідження була чітко сформульована методика проведення експериментальних досліджень, а також розроблено відповідну програму та визначено об'єкт досліджень. Основна мета методики полягала у перевірці адекватності отриманих аналітичних даних та виявленні впливу різних параметрів на складові сили різання ґрунтів. Програма вимагала дотримання умов подібності процесів, що відбуваються при взаємодії фізичної моделі з навколишнім середовищем, шляхом забезпечення рівності критеріїв геометричної та динамічної подібності. В якості робочого середовища було запропоновано використання ґрунтів III, IV та V категорій.

6. Проведено експериментальні дослідження, після чого проведено порівняльний аналіз, теоретичних та експериментальних результатів досліджень. Експериментальні дослідження були успішно проведені на спеціально вдосконаленому динамо-

метричному стенді з використанням рухомих просторово орієнтованих ножів. Результати випробувань підтвердили ключові теоретичні положення про зниження сили різання. Здійснений порівняльний аналіз теоретичних та експериментальних даних показав достатню збіжність результатів, що свідчить про адекватність розроблених аналітичних моделей. Було встановлено кількісний показник похибки, де максимальна похибка визначення сили різання склала $\Delta_{\delta} = 10,06 \%$, що є прийнятним показником для інженерних розрахунків і підтверджує достовірність отриманих теоретичних залежностей.

7. Кількісне підтвердження зниження сили різання. Проведені розрахунки та побудовані графіки для бульдозера з відвалом шириною 4 м наочно демонструють істотне зменшення сили різання при використанні просторово орієнтованих ножів. Зокрема, при різанні на глибині 25 см, сила різання для відвалу без ножа становить 120 кН. При застосуванні просторово орієнтованого ножа з оптимальним кутом $\alpha \approx 90^\circ$ сила різання зменшується до 50 кН, а при $\alpha = 45^\circ$, сила зменшується – до 79 кН. Це є прямим кількісним доказом того, що збільшення кута α призводить до мінімізації необхідного тягового зусилля і, відповідно, опору ґрунтів⁷.

8. Пряма залежність між кутом α , швидкістю та продуктивністю. Чітко встановлено, що зменшення опору різанню дозволяє бульдозеру розвивати вищу робочу швидкість. Відповідно до розрахунків, на глибині різання 25 см швидкість роботи бульдозера без ножів становить лише 3 м/хв, тоді як при використанні ножа з кутом $\alpha \approx 90^\circ$ швидкість зростає до 7,5 м/хв. Це зростання робочої швидкості та зниження опору ґрунтів різанню є прямими факторами, які призводять до значного збільшення загальної продуктивності машини.

9. Зниження енергоємності. Підтверджено, що ключовим показником ефективності є енергоємність – кількість енергії, необхідної для виконання одиниці роботи. Оскільки рухомі ножі дозволяють машині розвивати вищу швидкість і знижують загальний опір, це призводить до зниження питомої витрати енергії на одиницю виконаного обсягу роботи. Оптимізація цього показника є основним завданням для максимізації вигоди та зниження експлуатаційних витрат у будівельній та гірничодобувній галузях.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Баладінський В. Л. Будівельна техніка: навчальний посібник. Київ: Либідь, 2001. 368 с.
2. Баладінський В.Л. та ін. Будівельні і меліоративні машини: Підручник. В.Л.Баладінський, В.С.Зінь, С.В.Кравець, О.В.Маркова, Л.Є.Пелевін, Ю.П.Пристаїло, М.П.Скоблюк, В.М.Смірнов, В.Ф.Ткачук, А.В.Фомін. – Рівне: РДТУ, 1998. – 404 с.
3. Ветров Ю.О., Власов В.В. (1995) Машини для земляних робіт. Приклади розрахунку. Київ. ІСДО, 304 с.
4. Хмара, Л. А., & Кравець, С. В. (2014). Машини для земляних робіт. Харків: ХНАДУ.
5. Сукач М.К. Будівельні машини і обладнання. Київ: Ліра-К, 2020. 390 с.
6. Кравець С.В. Теорія руйнування робочих середовищ: Навчальний посібник. – Рівне: НУВГП, 2008. – 124 с.
7. Баладінський В.Л., Гаркавенко О.П., Кравець С.В. та ін. Машини для земляних робіт: Підручник. – Рівне: РДТУ, 1999. – 288 с.
8. Костенюк А., Фомін А., Тетерятник О., Боковня Г. (2017). Розподілення енергії в робочій зоні при різанні ґрунтів. Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини, Вип. 89, 73-80.
9. Смірнов В. М. Основи теорії різання ґрунтів просторово орієнтованими ножами землерийних машин / К.: «МП Леся», 2009 – 260 с.
10. Смирнов, В. М. (2012). Оптимізація геометричних параметрів відвалів бульдозерів з урахуванням мінімальної енергоємності різання. Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". Серія: Динаміка та міцність машин, (16), 115–123.
11. Хмара Л. А., Кравець С. В., Нічке В. В., Назаров Л. В., Скоблюк М. П., Нікітін В. Г. (2010). Машини для земляних робіт: навчальний посібник. Рівне – Дніпропетровськ – Харків, 557 с.
12. Кушнір, Р. М., & Павлиш, В. А. (2018). Основи ґрунтової механіки та будівельних конструкцій. Львів: Львівської політехніки, 280 с.

13. Godwin, R. J., & O'Dogherty, M. J. J. J. (2007). Integrated soil tillage force prediction models. *Journal of Terramechanics*, 44(1), 3–14. <https://doi.org/10.1016/j.jterra.2006.02.001>
14. Peurifoy, R. L., Schexnayder, C. J., Shapira, A., & Schmitt, R. (2014). *Construction planning, equipment, and methods* (9th ed.). McGraw-Hill Education.
15. Сукач М. К., Горбатюк Є. В., Марченко О. А. Синтез землерийної і дорожньої техніки: підручник / за ред М. К. Сукача. Київ: ЛіраК, 2017. 376 с.
16. В.В.Нічке, М.А.Антонов, О.А.Єрмакова. Робочі процеси землерийно-транспортних машин і їх інтенсифікація: Учбовий посібник. Харків: УСДО, 1995. 184 с.
17. Мусійко В.Д. Екскаватори повздовжнього копання: Навч. Посібник. – К.: НТУ, ЗАТ «Віпол», 2008. – 240 с.
18. Ветров Ю. О., Кархов А. А., Кондра А. С., Станєвський В. П. (1965). *Машини для земляних робіт*. Київ, Вища школа, 462 с.
19. Баладінський В., Гаркавенко О., Кравець С., Русан І., Фомін А. (2000). *Машини для земляних робіт*. Рівне. РДТУ, 288 с.
20. Гарнець В., Шаленко В., Маслюк А. (2018). *Методологія створення машин. Практикум та завдання до курсового проєктування: Навчальний посібник*. Київ, КНУБА, 100 с.
21. Тетерятник О., Рашківський В. Відмінності розрахунків високошвидкісних робочих органів в залежності від кінематики їх робочих процесів. Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини. Вип. 98. 5-10 с. DOI: 10.32347/gbdmm2021.98.0101.
22. Лабінський, С. П. (2007). *Механіка ґрунтів: Навчальний посібник*. Національний університет "Львівська політехніка".
23. Terzaghi, K., Peck, R. B., & Mesri, G. (1996). *Soil Mechanics in Engineering Practice* (3rd ed.). Wiley.
24. Goberman L. A. (1988). *Fundamentals of theory, calculation and design of construction and road machines: Manual for technical schools, Mechanical engineering*, 464 p.

25. Зінь В.С. Меліоративні машини (Теорія і розрахунок): Навчальний посібник. – К.: НМК ВО, 1992. – 120 с.
26. Мачишин Г. М. (2014). Робочі органи машин та механізмів для очищення поверхонь будівельної техніки. Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини. Вип. 83. 69-79 с.
27. Тітова Л. Л. Обґрунтування технічних заходів підтримання працездатності машин для лісотехнічних робіт / Л. Л. Тітова, І. Л. Роговський // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. – Х., 2015. – Вип. 160. – С. 189–195.
28. Caterpillar © [Електронний ресурс] : інтернет-ресурс виробника обладнання. URL: https://www.cat.com/en_GB.html.
29. Komatsu © [Електронний ресурс] : інтернет-ресурс виробника обладнання. URL: <https://www.komatsu.com/en-us>
30. JCB © [Електронний ресурс] : інтернет-ресурс виробника обладнання. URL: <https://www.jcb.com/uk-UA/>
31. Кириченко І.Г., Назаров Л.В., Нічке В.В. та ін. Наукові основи створення високоефективних землерийно-транспортних машин. – Харків, 2003. – 508 с.
32. Електронний ресурс «Google Trends» – Спосіб доступу: trends.google.com.
33. Електронний ресурс «Googlepatent». – Спосіб доступу: patents.google.com.
34. Електронний ресурс «Esp@cenet». – Спосіб доступу: ep.espacenet.com.
35. Електронний ресурс «База патентів України». – Спосіб доступу: uapatents.com.
36. Міжнародна патентна класифікація 01.2025
37. ДСТУ 3575-97. Патентні дослідження. Основні положення та порядок проведення.
38. Рашківський В., Федишин Б. (2021). Аналіз характеру стружкоутворення при роботі просторово-орієнтованими ножами динамічної дії. Гірничі, будівельні,

дорожні та меліоративні машини. Вип. 97. С. 57–61.
<https://doi.org/10.32347/gbdmm97.0402>.

39. Рашківський В., Федішин Б. (2021). Дослідження процесу руйнування ґрунтів просторово орієнтованими ножами динамічної дії. Сучасні проблеми та перспективи розвитку машинобудування України: матеріали Міжнар. наук.-практ. онлайн конф., 23-24 верес. 2021 р. Київ: НУБІП. С. 219-221.

40. Рашківський В., Федішин Б. (2020). Аналіз засобів різання ґрунтів просторово-орієнтованими ножами динамічної дії землерийних машин. Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини. Вип. 96. С. 28–34.
<https://doi.org/10.32347/gbdmm2020.96.0401>.

41. Пат. Україна № 111399, кл. E02F 3/815. Відвал з об'ємною ножовою системою / К. Ц. Главацький, О. В. Середа, Ю. М. Кифорчук, С. Л. Краснощок. Опубліковано 25.01.16 Бюл. № 2.

42. Пат. Україна № 112205, кл. E02F 3/815. Відвал бульдозера з комбінованою ножовою системою / В. М. Богомаз, К. Ц. Главацький, М. О. Дорогокупля, С. Л. Краснощок, В. М. Проскурня, О. В. Середа. Опубліковано 10.12.15 Бюл. № 23.

43. Хмара Л. А., Колесник Н. П., Станевський В. П. (1992). Модернізація та підвищення продуктивності будівельних машин., Київ, Будівельник, 152 с.

44. Щербак Д. В., Огар В. В. Стратиграфія Українського щита та його схилів : Навчальний посібник. — К. : ВПЦ Київського університету, 2005. — 85 с.

45. Інтернет ресурс «Карти України», URL:
<https://geomap.land.kiev.ua/geology.html>

46. Сукач М. К. Будівельна техніка: Навчальний посібник, Київ, Сімферополь: КНУБА–НАПКС, 2010. 296 с.

47. Лозовіцький, П. С. (2014). Меліорація ґрунтів та оптимізація ґрунтових процесів. Київ.

48. Gransberg, D. D., Popescu, C. M., & Ryan, R. C. (2006). Construction equipment management for engineers, estimators, and construction managers. Taylor and Francis Books, Inc.

49. Сукач, М. К., Горбатюк, Є. В., & Марченко, О. А. (2017). Синтез землерийної і дорожньої техніки. К.: Ліра-К.
50. Сукач М. К. Будівельні машини і обладнання: підручник. Київ: Ліра-К, 2016. 390 с.
51. Рашківський В., Федішин Б. Зменшення енергоємності процесу різання ґрунтів землерийною технікою з просторово орієнтованим робочим органом. Енергоощадні машини і технології: тези III Міжнар. наук.-практ. конф., 17-19 трав. 2022 р. Київ: КНУБА. С. 98.
52. Rashkivskiy V., Fedyshyn B. (2023). Development of the information model of the soil cutting process spatially oriented knife of dynamic action. Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини, (102), 24–30. <https://doi.org/10.32347/gbdmm.2023.102.0301>
53. Назієв М.І. (1994). Лінійна алгебра та аналітична геометрія. -К., Либідь,
54. Капітонова Ю. В., Кривий С. Л., Летиченський О. А. (2002) Основи дискретної математики. – К.:Наукова думка , 578 с.
55. Rashkivskiy V., Fedyshyn B. (2023). Development of a parametric model of the spatially oriented knife on the bulldozer blade. Strength of Materials and Theory of Structures. Issue 111. P. 263–275. <https://doi.org/10.32347/2410-2547.2023.111.263-275>
56. Haycraft, D. (2002). Earthmovers. MBI Publishing Company.
57. Orlemann, E. C. (2001). Giant earth moving equipment. MBI Publishing Company.
58. Peurifoy, R. L., Schexnayder, C. J., Shapira, A., & Schmitt, R. (2010). Construction planning, equipment, and methods (8th ed.). McGraw-Hill.
59. Онищенко О. Г., Онищенко В. О., Коробко Б. О., Вірченко В. В. Будівельна техніка, Київ, Кондор, 2017. 416 с.
60. Дорожні машини. Ч. II Машини для будівництва, ремонту та утримання автомобільних доріг: навч. посіб. / Л. А. Хмара, О. С. Шипілов, В. Д. Мусійко, М. П. Кузьмінець. Київ - Дніпропетровськ: НТУ, 2013. 400 с.
61. Костенюк О., Фомін А., Тетерятник О., Боковня Г. (2018). Реологічна модель руйнування ґрунту робочими органами зі структурованим рухом різальних

елементів. / Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини, В 91, 58–65 с.
<http://gbdmm.knuba.edu.ua/article/view/147348/146724>.

62. Пелевін Л.Є., Горбатюк Є.В., Пристайло М.О., Мельниченко Б.М. Експериментальні дослідження заглиблення зуба розпушника при різних швидкостях переміщення базової машини. Гірничі, будівельні, дорожні і меліоративні машини. 2020. №95. 47-53 с.

63. Тітова Л.Л. Математична модель оптимізації параметрів виробничих процесів машин для лісотехнічних робіт. Техніка та енергетика / Machinery & Energetics. В12. 77-85 с.

64. Пелевін Л. Є. Стабілізація режиму заглиблення робочого органу розпушувача/ АВ Фомін, ЛЄ Пелевін, БМ Мельниченк / Вісник Харківського національного автомобільно-дорожнього університету. 2008. № 57. 174-179 с.

65. Мусійко, В. Д., & Коваль, А. Б. (2018). Теорія і створення інноваційних машин безперервної землерийної дії (2-ге вид.)

66. Rashkivskyi V., Fedyshyn B. (2023). Modelling of soil destruction process by bulldozer using a spatially oriented working unit. Transfer of innovative technologies, 6(1), 58–70. <https://doi.org/10.32347/tit.2023.61.0202>

67. Михайленко В. М., Федоренко Н. Д., Демченко В. В. (2003). Дискретна математика. Київ, Європ. 319 с.

68. Федішин Б. М. Інформаційна модель розрахунку взаємодії просторово орієнтованого ножа з робочим середовищем. Енергоощадні машини і технології: матеріали IV Міжнар. наук.-практ. конф., 23–25 трав. 2023 р. К.: КНУБА, 2023. С. 65–68.

69. Почка К. І., Абрашкевич Ю. Д., Пристайло М. О., Поліщук А. Г. (2023). Методика проведення експериментальних досліджень різання високоабразивних матеріалів абразивними армованими кругами. Modern Engineering and Innovative Technologies. Issue 25, Part 1. Р. 3-16. DOI: 10.30890/2567-5273.2023-25-01-016.

70. Абрашкевич Ю., Поліщук А. (2013). Дослідження впливу теплових процесів на працездатність відрізних інструментів. Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини. Вип. 81. 39-44 с.

71. Ловейкін В.С. І.І. Назаренко, О.Г. Онищенко. (1998). Теорія технічних систем: навчальний посібник / Київ-Полтава: ІЗМН-ПДТУ, 175 с.
72. Ловейкін В.С., К. І. Почка. (2007). Побудова фізичної моделі роликової формувальної установки з рекупераційним приводом // Техніка будівництва. – № 20. 26-31 с.
73. Ловейкін В.С., Почка К.І. (2009). Динаміка роликової формувальної установки. Монографія / К.-Ромни: КНУБА, «ІСА-Інтерпапір», – 228 с.
74. Пелевін Л.Є. (2012). Обґрунтування вибору геометричних та динамічних параметрів моделювання різання ґрунту наконечником з консоллю / Л.Є. Пелевін, М.О. Пристайло // Техніка будівництва. – 2012. – № 28. – с. 70-75.
75. Rashkivskyi V. P., Prystailo M. O., Fedyshyn B. M., Besida A. S. (2025). Development of a physical model and determination of similarity coefficients of a spatially oriented knife of a bulldozer blade. Visnyk of Kherson National Technical University, 1, No. 1(92), 198–203. <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.1.1.25>
76. Патент України на винахід 13846, МПК G 01 L 5/16, G 01 N 3/58 (2006.01). Стенд для реєстрації сил різання / Л. Є. Пелевін, М. О. Пристайло, Т. Ю. Пристайло (Україна); заявник і патентовласник Науково-дослідний інститут будівельної, дорожньої та інженерної технології, № у 2005 10393; заявлено 03.11.2005; опубліковано 17.04.2006, Бюлетень № 4.
77. Абрашкевич Ю. Д., Пелевін Л. Є., Поліщук А. Г. (2012). Підвищення експлуатаційних показників абразивного інструменту. Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини. Вип. 80. 30-37 с.
78. Абрашкевич Ю., Рашківський В., Поліщук А., Човнюк О. (2015). Силкові параметри машин з абразивним інструментом. Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини. Вип. 85. 67-71 с.
79. Вказівки по швидкому монтажу та введення в дію перетворювача частоти на 0,75 кВт Suswe – T13-750W-12H – Вхідна напруга: 1-ф, 220V.
80. Вказівки по швидкому монтажу та введення в дію перетворювача частоти на 4 кВт FRECON - FR150-4T-4.0 B – Вхідна напруга: 3-ф, 380В

81. Абрашкевич Ю. Д., Почка К. І., Пристайло М. О., Поліщук А. Г. (2023). Розробка установки для різання високоабразивних матеріалів алмазними дисками та абразивними армованими крутами. Current issues of science and integrated technologies: Proceedings of the I International Scientific and Practical Conference. Milan, Italy. January 10-13, P. 656-663.
82. Maksymiuk Yu. V., Rashkivskyi V. P., Prystailo M. O., Fedyshyn B. M. (2024). Development and computer testing of equipment for cutting soils with spatially oriented knives of a bulldozer blade. *Strength of Materials and Theory of Structures*. Issue 113. P. 285–296. <https://doi.org/10.32347/2410-2547.2024.113.285-296>
83. Фецишин Б. Створення та аналіз моделі просторово орієнтованого ножа землерийної техніки за допомогою CAD програм. Build-Master-Class-2024: Proceedings of the International Scientific-Practical Conference of Young Scientists (November 5–7, 2024). Kyiv: KNUCA, 2024. 321–322.
84. Ловеїкін В. С., Почка К. І., Ромасевич Ю. О., Почка О. Б. (2019). Динамічний аналіз роликової формувальної установки з кривошипно-шатунним приводним механізмом. Опір матеріалів і теорія споруд. Вип 102. 91-108 с. DOI: 10.32347/2410-2547.2019.102.91-108.
85. Ловеїкін В. С., Почка К. І., Пристайло М. О., Почка О. Б. (2019). Динамічне зрівноваження привідного механізму роликової формувальної установки з енергетично врівноваженим приводом. Опір матеріалів і теорія споруд. Вип 103. 112-130 с. DOI: [10.32347/2410-2547.2019.103.112-130](https://doi.org/10.32347/2410-2547.2019.103.112-130).
86. Loveikin V. S., Pochka K. I., Prystailo M. O., Balaka M. M., Pochka O. B. Impact of cranks displacement angle on the motion non-uniformity of roller forming unit with energybalanced drive. *Strength of Materials and Theory of Structure: Scientific and technical collected articles*. 2021. Issue 106. P. 141-155. DOI: [10.32347/2410-2547.2021.106.141-155](https://doi.org/10.32347/2410-2547.2021.106.141-155).
87. Fedyshyn B. Simulation of a spatial moving knife of a dump working body. Проблеми та перспективи розвитку технічних та біоенергетичних систем природо-користування: конструювання та дизайн: тези доп. XXIV Всеукр. конф. наук.-пед.

працівників, наук. співробітників та аспірантів (10–11 квіт. 2025 р.). К.: НУБіП України, 2025. С. 95–96.

88. Рашківський В., Федішин Б. Дослідження деформацій просторово орієнтованого ножа динамічної дії при роботі землерийної техніки. Build-Master-Class-2022: Proceedings of the International scientific-practical conference of young scientists, November 30 – December 02, 2022. Kyiv: KNUCA, 2022. P. 247–248.

89. Аржаєв Г., Пелевін Л., Балака М. (2008). Методика і інформаційно вимірювальне забезпечення експериментального визначення параметрів реологічної моделі пісчаноглинистих ґрунтів. Машинознавство, 12(138). Львів: ТОВ КІНПАТРІ. 40–42 с.

90. Loveikin V. S., Pochka K. I., Prystailo M. O., Balaka M. M., Pochka O. B. (2021). Dynamic balancing of roller forming unit drive. Strength of Materials and Theory of Structure: Scientific and technical collected articles. Issue 107. P. 140-158. DOI: 10.32347/2410-2547.2021.107.140-158.

91. Абрашкевич Ю. Д., Пелевін Л. Є., Рашківський В. П. (2016). Обладнання для монтажних робіт. Київ: КНУБА. 238 с.

92. Abrashkevych Yu. D., Machyshyn H. M., Marchenko O. A., Balaka M. M., Zhukova O. H. Mechanical strength increasing of abrasive reinforced wheel. Strength of Materials and Theory of Structures: Scientific-and-technical collected articles. 2022. Issue 108. P. 295-308. DOI: 10.32347/2410-2547.2022.108.295-308.

93. Роговський І. Л., Калініченко Д. Ю. Методика непараметричної побудови динаміки абразивного зношування робочих поверхонь деталей будівельних машин. Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. №. 298. 137-147 с.

94. Почка К. І., Абрашкевич Ю. Д., Пристайло М. О., Поліщук А. Г. (2022). Побудова фізичної моделі установки для різання високоабразивних матеріалів абразивними армованими кругами. Вісник Херсонський Національний Технологічний Університет. Вип 3 (82). 30-36 с. DOI: 10.35546/kntu2078-4481.2022.3.4.

95. Пелевін Л. Є., Пристайло М. О., Пристайло Т. Ю. (2005). Удосконалення реєстрації сил різання в лабораторних умовах. Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини. Вип. 65. 58-62 с.
96. Loveikin V. S., Romasevych Yu. O., Loveikin A. V., Liashko A. P., Pochka K. I., Balaka M. M. Drive power minimization of outreach change mechanism of tower crane during steady-state slewing mode. *Strength of Materials and Theory of Structure: Scientific and technical collected articles*. 2022. Issue 109. P. 317-330. DOI: 10.32347/2410-2547.2022.109.317-330.
97. Яцун М.А. (2004). Електричні машини: навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів. – Львів: ЛНУ «Львівська політехніка», – 439 с.
98. Пелевін Л. Є., Балака М. М., Пристайло М. О., Мачишин Г. М., Аржаєв Г. О. (2015). Теоретичні основи взаємодії пружно-деформованих виконавчих елементів будівельної техніки і робочого середовища з врахуванням термореологічних процесів. Монографія. Київ: Інтерсервіс. 232 с.
99. Rashkivskyi V., Prystailo M., Fedyshyn B., Balaka M. (2025). Methods of conducting a bench-scale experimental study with a spatially oriented knife of a bulldozer blade. *International Science Journal of Engineering & Agriculture*, 4(1), 79–92. <https://doi.org/10.46299/j.isjea.20250401.07>.
100. Пелевін, Л., Тетерятник, О., Комоцька, С., & Федішин, Б. (2022). Врахування закономірностей фізичних процесів в конструкціях робочих органів динамічного руйнування. Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини, (100), 29–38. <https://doi.org/10.32347/gbdmm.2022.100.0401>
101. Роговський І. Л., Виговський С. М. (2019). Фактори впливу на абразивну зносостійкість деталей будівельних машин, наплавлених титаноазотовмісним білим чавуном. *Техніка та енергетика*. Вип. 10, №. 1. 189-194 с.
102. Pelevin L., Gorbatyuk Ie., Zaichenko S., Shalenko V. (2017). Developing a mathematical substantiation for the physical modeling of the soil-ripping equipment work process. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, Vol.6/2(90), 52-60. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.118429>.

103. Пелевін Л. Є. Визначення кінематичних та силових показників торцевого робочого органу траншеєкопача з керованими силовими параметрами / Л. Є. Пелевін, В. П. Рашківський // Техніка будівництва : наук.-техн. журн. / Київ. нац. ун-т буд-ва та архіт. ; відп. ред. І. І. Назаренко. - Київ : КНУБА, 2009. - Вип. 23. - С. 10 - 16.
104. Федішин Б., Балака М. Верифікація переміщення просторово орієнтованого ножа на випробувальному стенді. Енергоощадні машини і технології: матеріали VI Міжнар. наук.-практ. конф. (20–21 трав. 2025 р.). К.: КНУБА, 2025. С. 57–60.
105. Пристайло М.О., Марчук К.. Інноваційні шляхи вдосконалення будівельної техніки з огляду на потреби сучасної будівельної індустрії. Гірничі, будівельні, дорожні і меліоративні машини. 2019. №94. 35-41 с.
106. Пелевін Л.Є., Балака М.М., Пристайло М.О., Мачишин Г.М., Аржаєв Г.О. Теоретичні основи взаємодії пружно-деформованих виконавчих елементів будівельної техніки і робочого середовища з врахуванням термореологічних процесів: монографія. К.: Інтерсервіс. 2015. 232 с.
107. Rashkivskyi V., Prystailo M., Fedyshyn B. (2025). Results of experimental studies of cutting soils with spatially oriented knives of blade equipment. Girnychi, budivelni, dorozhni ta melioratyvni mashyny, (105), 62–72. <https://doi.org/10.32347/gbdmm.2025.105.0401>
108. Пелевін Л.Є. Обґрунтування вибору геометричних та динамічних параметрів моделювання різання ґрунту наконечником з консолю. / Пелевін Л.Є., Пристайло М.О. Техніка будівництва. 2012. № 28. 70-75 с.
109. Пелевін Л. Є. Підвищення надійності і довговічності приводів динамічних робочих органів будівельної техніки на основі стендових випробувань: Монографія. - К.: Українська академія наук, «МП Леся». 2008. 196 с.
110. Пристайло, М., Балака, М., Мажарівський, В., Драчук, В., Гонта, І. (2023). Інноваційні шляхи вдосконалення машин для підготовчих робіт з огляду на потреби сучасної будівельної індустрії. Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини, (102), 49–57. <https://doi.org/10.32347/gbdmm.2023.102.0402>

111. Gorbatyuk Ie., Balaka M., Mishchuk D. (2021). Information model of bulldozer-looser movement. The world of science and innovation. Abstracts of the 7th International scientific and practical conference (February 10–12, 2021). Cognum Publishing House. London, United Kingdom. 54–59.
112. Norton, R. L. (2021). Design of machinery: An introduction to the synthesis and analysis of mechanisms and machines (6th ed.). McGraw-Hill Education.
113. Loveikin V. S., Romasevich Yu. O., Shymko L. S., Loveikin Yu. V., Pochka K. I. (2022). The dynamic analysis of the joint trolley movement and hoisting mechanism in the tower crane. Strength of Materials and Theory of Structure: Scientific and technical collected articles. Issue 108. P. 267-282. DOI: 10.32347/2410-2547.2022.108.267-282.
114. Фомін А., Гаркавенко О., Костенюк О., Тетерятник О. (2019). Особливості руйнування робочих середовищ при інформаційності та співентропійності робочих процесів будівельної техніки. Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини, В 94, 42–50 с. <https://doi.org/10.32347/gbdmm2019.94.0401>.
115. Кравець С.В. Грунтозахисні та енергозберігаючі машини для прокладки підземних комунікацій. Основи теорії, проектування та створення. – Рівне: РДТУ, 1999. – 277 с.
116. Кравець С.В., зінь В.С., Маркова О.В. та ін. Машини для водного господарства: Підручник. – Рівне: НУВГП, 2006. – 348 с.
117. Тітова Л.Л., Роговський І.Л. Система контролю параметрів технічного стану машин для лісогосподарських робіт Teka Komisji Motoryzacji i Energetyki Rolnictwa. 2017. 73-81 с
118. Тітова Л. Л. Аналіз періодичності техобслуговування машин для лісотехнічних робіт / Л. Л. Тітова, І. Л. Роговський // Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: техніка та енергетика АПК. – К., 2015. – Вип. 212, ч. 1. – С 322–328.
119. SAE International. (2003). Capacity rating – Dozer blades (SAE Standard No. J1265). https://doi.org/10.4271/J1265_200305 .

120. Абрашкевич Ю. Д., Смірнов В. М., Пелевін Л. Є., Рашківський В. П. Механізація трудомістких процесів : Навчальний посібник. – К. : КНУБА, 2006. – 80 с.
121. Shapira, A., Lucko, G., & Schexnayder, C. J. (2006). Innovations in earth-moving equipment: New forms and their evolution. *Journal of Construction Engineering and Management*, 132(9), 896–906.
122. Tatum, C. B., Williams, J. M., & Hancher, D. E. (2006). Knowledge-based excavation planning and control. *Journal of Construction Engineering and Management*, 132(9), 907–916.
123. Schmitt, R. L., Schexnayder, C. J., Cohen, A. B., Nichols, H. L., Jr., & Day, D. A. (2018). *Moving the earth: Excavation equipment, methods, safety, and cost* (7th ed.). McGraw-Hill Education.
124. Тітова Л. Л. Класифікація машин для лісотехнічних робіт за нормативною періодичністю відновлення їх працездатності / Л. Л. Тітова, І. Л. Роговський // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. – Х., 2016. – Вип. 167. – С. 243–249.
125. Wu, Z. Y., Sun, B., Zhang, C., & Zhang, J. H. (2023). Fatigue analysis of dozer push arms under tilt bulldozing conditions. *Machines*, 11(1), 38. <https://doi.org/10.3390/machines11010038>

ДОДАТКИ

Додаток А

Льодовикові рівнини

Грубоуламкові зі зв'язними породами

 Важкі і середні суглинки, рідше глини і супіски з неокатаними уламками корінних порід

Піщані

 Піски різнозерністі з включенням дрібних валунів корінних порід з прошарками і лінзами мулів

 Піски різнозерністі кварцеві з рідкими прошарками суглинків та супісків

Піщані зі зв'язними породами

 Піски різнозерністі кварцеві, суглинки, мули, і прісноводний мергель

 Піски різнозерністі кварцеві що перешаровуються з суглинками і містять дрібні валуни корінних порід

Зв'язні породи з піщаними

 Суглинки, глини, супіски, піски з прошарками гравію і гальки

 Піскуваті суглинки і супіски лесової структури, різнозерністі кварцеві піски

Зв'язні породи з включенням уламкових

 Моренно-валунні суглинки, глини, супіски і піски

Торф

 Торф підстилений аллювіально- флювіоглаціальними суглинисто-піщаними відкладами

Суглинки середні і легкі

 Лесові породи з викопними ґрунтами підстильні пісками з прошарками суглинків та супісків

 Лесові породи з викопними ґрунтами підстильні мореною, суглинками, супісками, піском і глиною

 Лесові породи з викопними ґрунтами підстильні мореною, суглинками і пісками

 Лесові породи з викопними ґрунтами підстильні мореною, суглинками і пісками

Позальодовикові рівнини

Грубоуламкові зі зв'язними породами

 Важкі і середні суглинки, з включенням уламків корінних порід

Піщані

 Піски різнозерністі кварцеві, місцями з поверхні перевіяні вітрами

 Піски різнозерністі кварцеві

 Піски різнозерністі місцями з черепашковим детритусом

Піщані зі зв'язними породами

 Піски різнозерністі кварцеві з прошарками суглинків, супісків та мцлів, місцями містить включення гальки, прошарки галечників і торфовищ

Зв'язні породи з піщаними

 Суглинкових-супесчано відкладення, що перешаровуються з різнозерністими пісками

Зв'язні породи з включенням уламкових

 Суглинки з включенням щебеню корінних порід

 Суглинки, що перешаровуються пісками і галечником

Зв'язні породи

 Середні і важкі суглинки, глини

 Середні і важкі суглинки з включенням слабоокатаних уламків корінних порід, глини

Мул

 Мул

Продовження додатку А

Суглинки важкі і середні

 Суглинки лесової структури

 Лесові породи з викопними ґрунтами підстильні алювіальними пісками і суглинками

 Лесові породи з викопними ґрунтами підстильні древньоалувіальними суглинисто-пісчаними відкладами

Суглинки середні і легкі

 Суглинки лесової структури

Оглеєні подові суглинки

 Суглинки лесової структури

Крайові прогини і западини

Передгірні рівнини

Грубоуламкові

 Галечники з суглинисто-піщаним заповненням

Грубоуламкові зі зв'язними породами

 Галечники, суглинки, піски

Піщані

 Піски різнозернисті кварцеві

Піщані зі зв'язними породами

 Піски різнозернисті кварцеві з прошарками суглинків

 Суглинки і піски відкладення, що перешаровуються з включенням гальки, місцями торфовища

Зв'язні породи з піщаними

 Суглинки, піски, місцями моренно-валунні суглинки і піски

 Суглинки, піски, гравійно-галечні відклади і супіски з включенням валунів, місцями торфовища

Зв'язні породи з включенням уламкових

 Важкі і середні суглинки, глини з включенням гальки і валунів, валечники

 Суглинки і глини з включенням щебеню і слабкоокатаних уламків, покривні галечники з піщано-суглинистим заповнюванням

Ефузивно-осадкові

Скельні породи з пластичними і піщаними

 Глини, пісковики, андезити, базальти

Карбонатно-теригенні

Напівскельні породи з пластичними і піщаними

 Глиністі сланці, глини, пісковики, вапняки

Флишеві

 Аргіліти, алевроліти, пісковики, вапняки

Додаток Б

Таблиця 1. Сила різання важкого мергелистої глини на глибині 10, 20, 35 см

α	Мергелиста глина								
	h , см								
	10			20			35		
	P , кН	N , кН	P_o , кН	P , кН	N , кН	P_o , кН	P , кН	N , кН	P_o , кН
0°	6,25	3,33	0,00	12,04	6,41	0,00	19,75	10,51	0,00
10°	6,31	3,33	0,70	12,11	6,40	1,30	20,19	10,70	1,82
20°	6,19	3,20	1,43	12,20	6,31	2,70	21,10	10,97	4,25
30°	5,87	2,95	1,82	12,08	6,07	3,84	22,29	11,16	7,23
40°	5,75	2,95	2,83	12,47	6,24	7,11	24,62	11,95	16,35
45°	5,00	3,00	0,00	10,84	6,51	0,00	21,18	12,72	0,00
50°	4,91	2,95	0,34	10,39	6,24	0,73	19,92	11,95	1,39
60°	4,59	2,73	0,98	9,41	5,60	2,01	17,30	10,30	3,70
70°	4,17	2,44	1,54	8,29	4,84	3,06	14,57	8,51	5,38
80°	3,71	2,10	2,03	7,16	4,04	3,92	12,15	6,86	6,66
90°	3,13	1,66	2,39	6,02	3,20	4,61	9,88	5,26	7,57

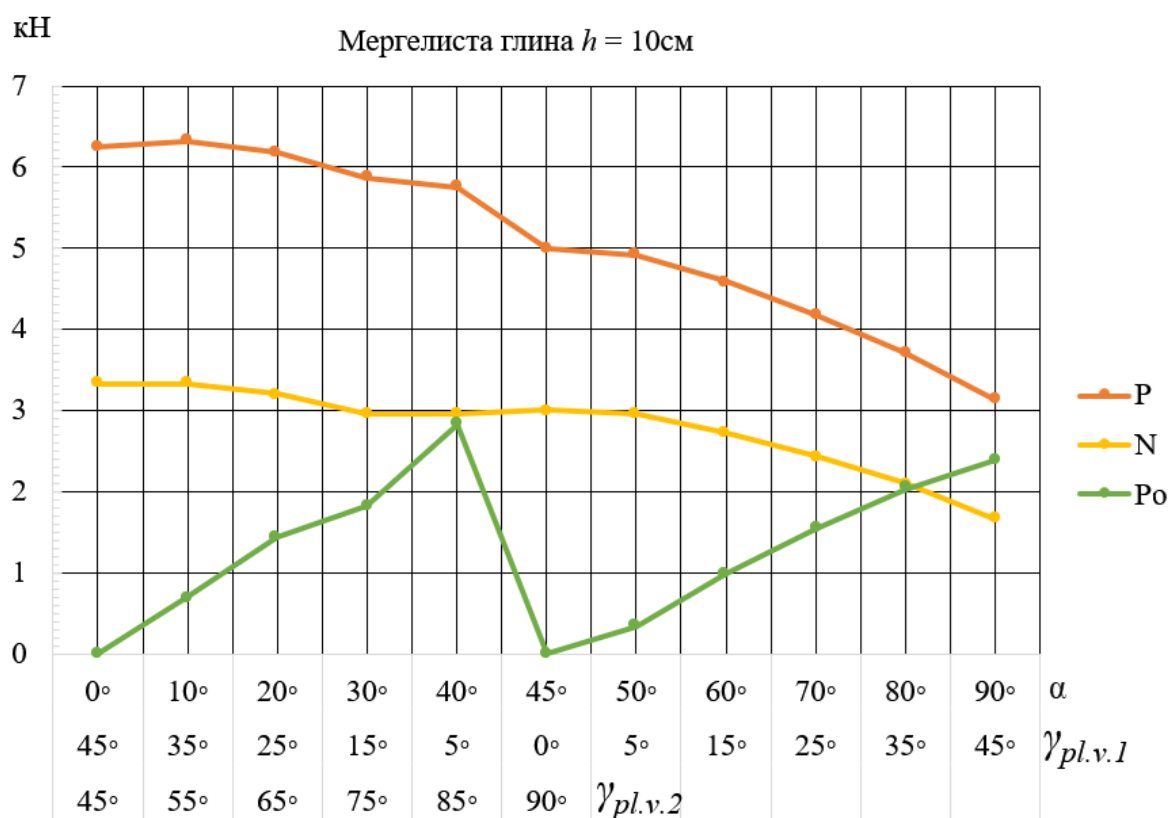


Рисунок 1. Сили різання мергелистої глини на робочій глибині

Продовження додатку Б

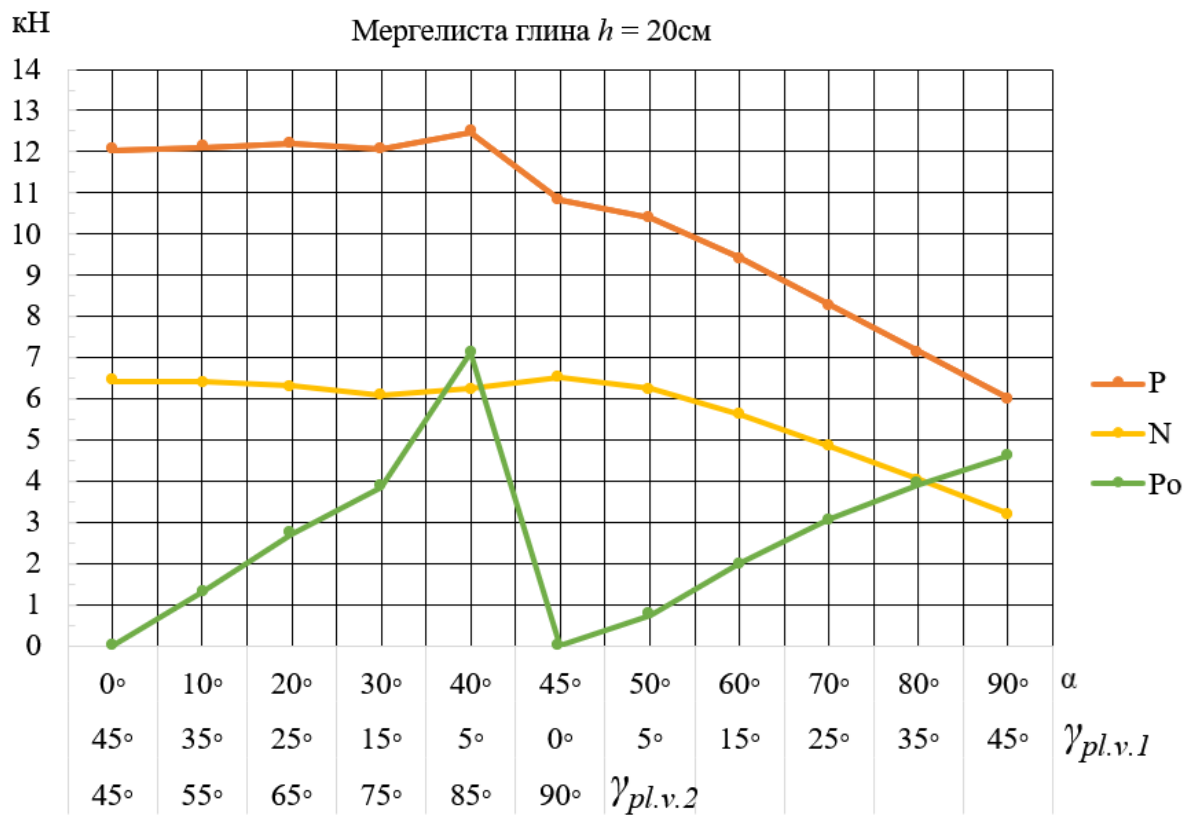


Рисунок 2. Сили різання мергелистої глини на докритичній глибині

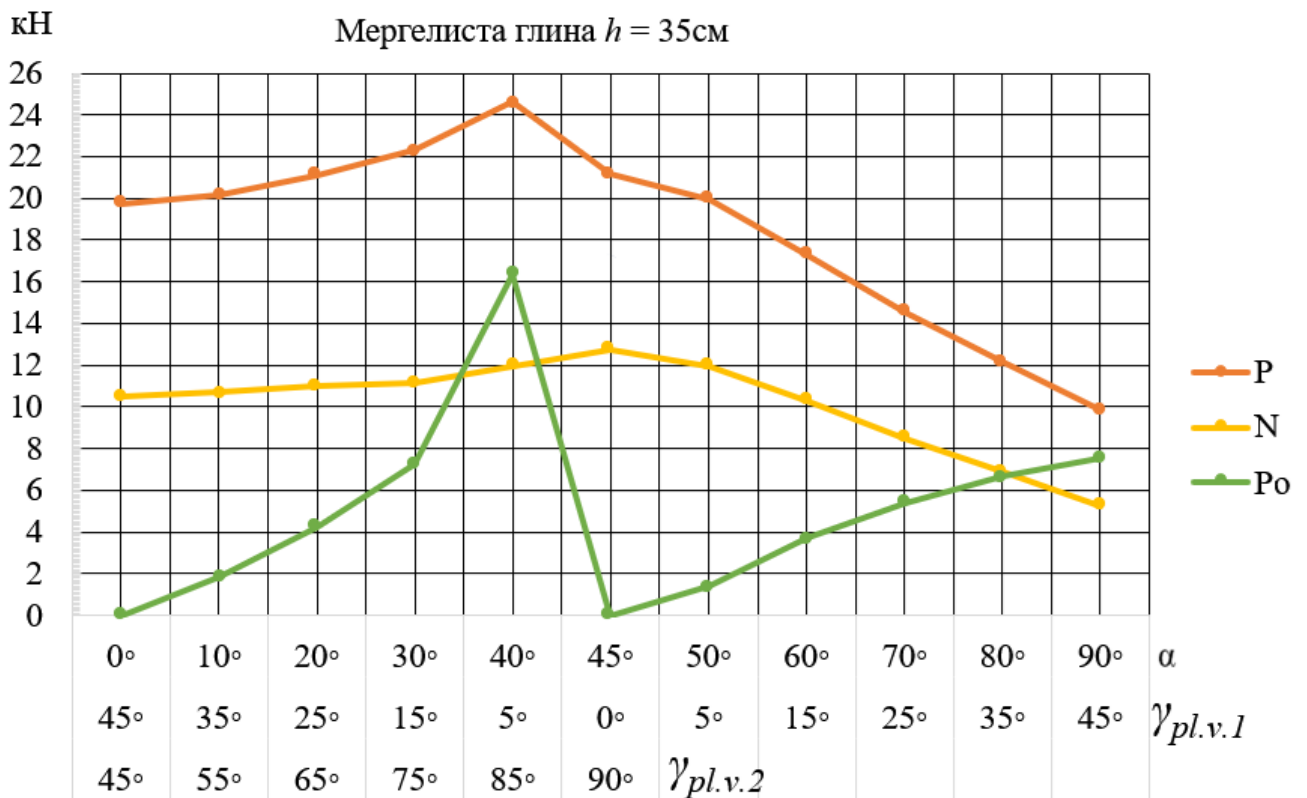


Рисунок 3. Сили різання мергелистої глини на критичній глибині

Продовження додатку Б

Таблиця 2. Сила різання аргіліту на глибині 10, 20, 35 см

α	Аргіліт								
	$h, \text{см}$								
	10			20			35		
	$P, \text{кН}$	$N, \text{кН}$	$P_o, \text{кН}$	$P, \text{кН}$	$N, \text{кН}$	$P_o, \text{кН}$	$P, \text{кН}$	$N, \text{кН}$	$P_o, \text{кН}$
0°	9,18	4,41	0,00	18,25	8,77	0,00	31,58	15,16	0,00
10°	9,42	4,40	2,36	18,72	8,76	4,62	32,71	15,32	7,67
20°	9,73	4,11	5,33	19,65	8,33	10,56	35,05	14,96	18,11
30°	10,13	3,27	9,59	20,86	6,81	19,39	38,27	12,72	34,44
40°	10,80	2,91	18,68	22,61	6,22	38,22	42,42	12,06	69,23
45°	5,32	2,95	0,00	11,61	6,43	0,00	22,83	12,66	0,00
50°	5,25	2,91	0,36	11,23	6,22	0,76	21,78	12,06	1,48
60°	4,98	2,73	1,03	10,42	5,71	2,16	19,61	10,75	4,07
70°	4,74	2,54	1,70	9,70	5,20	3,47	17,71	9,49	6,34
80°	4,66	2,40	2,47	9,31	4,79	4,94	16,51	8,51	8,76
90°	4,59	2,20	3,40	9,13	4,38	6,75	15,79	7,58	11,69

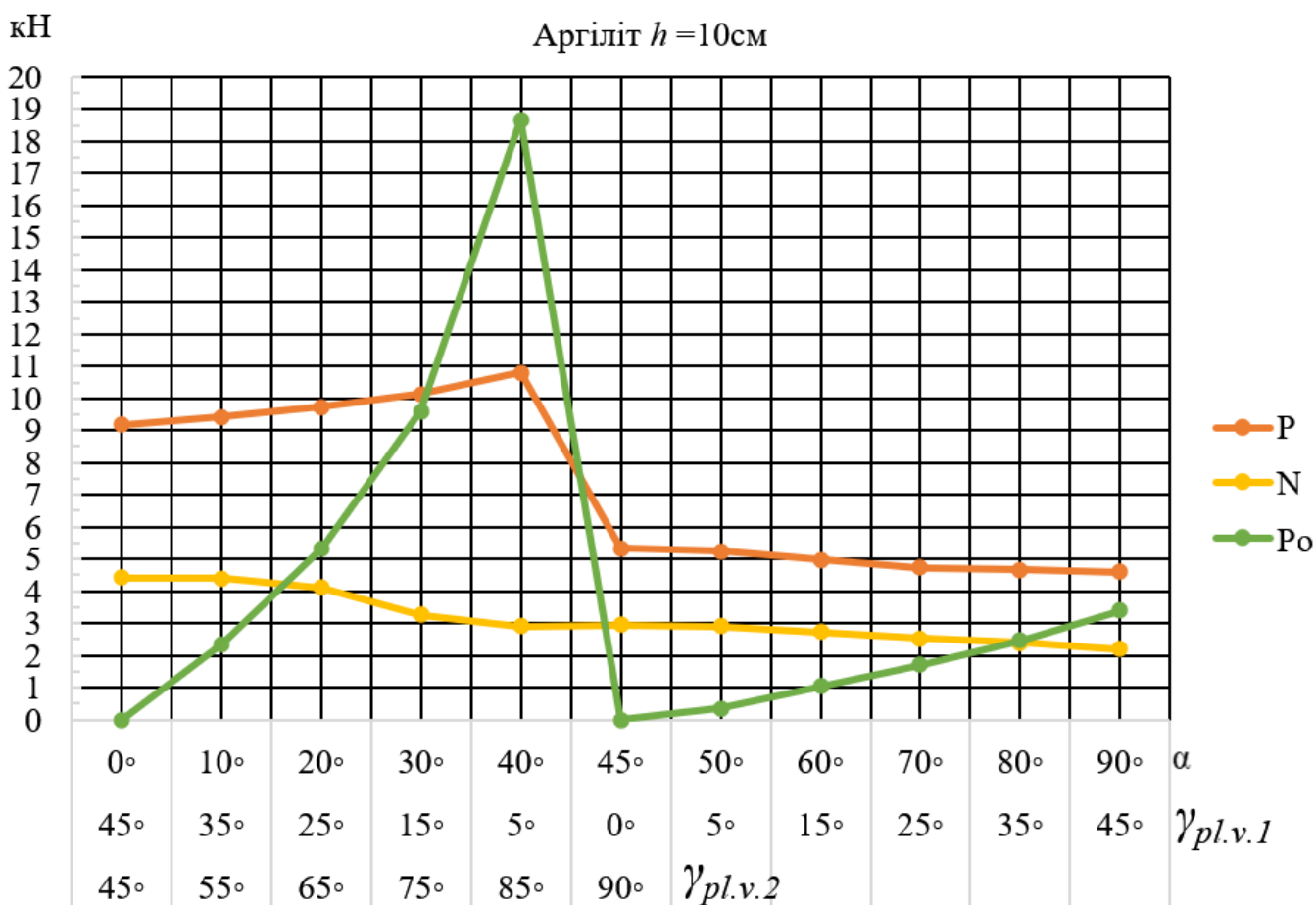


Рисунок 4. Сили різання аргіліту на робочій глибині

Продовження додатку Б

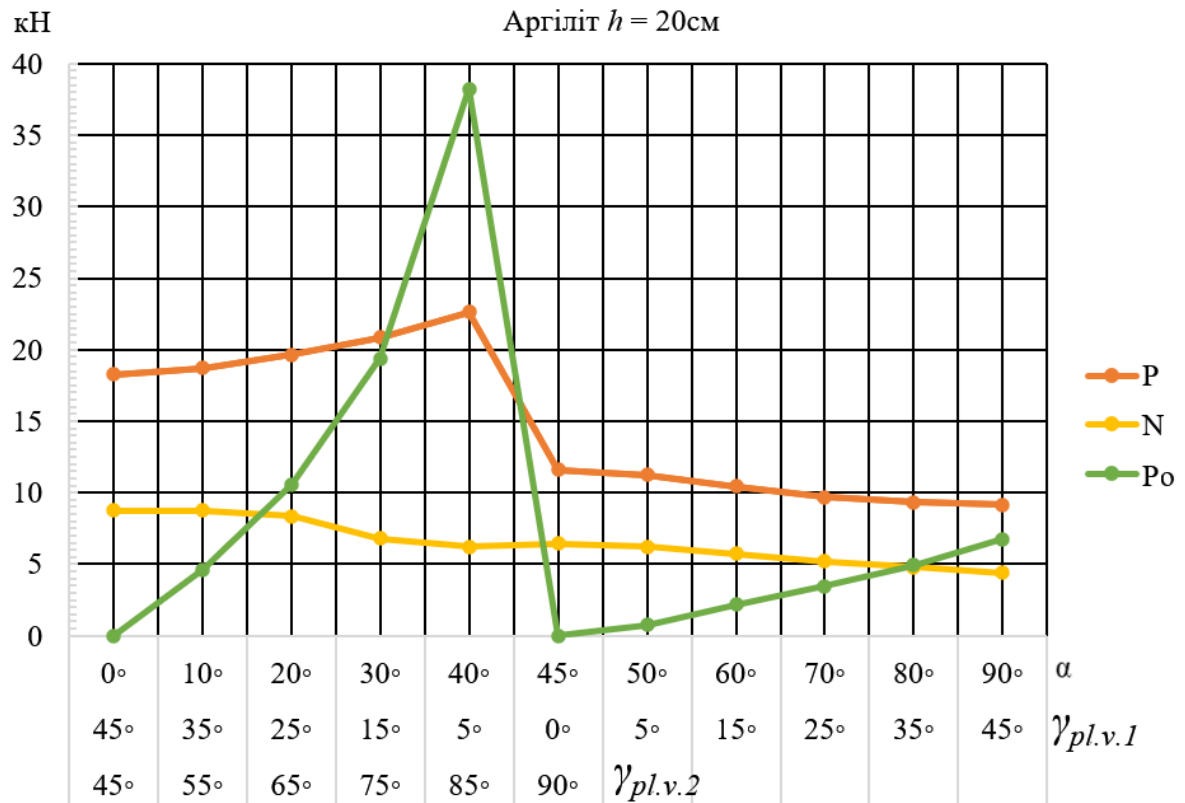


Рисунок 4. Сили різання аргіліту на докритичній глибині

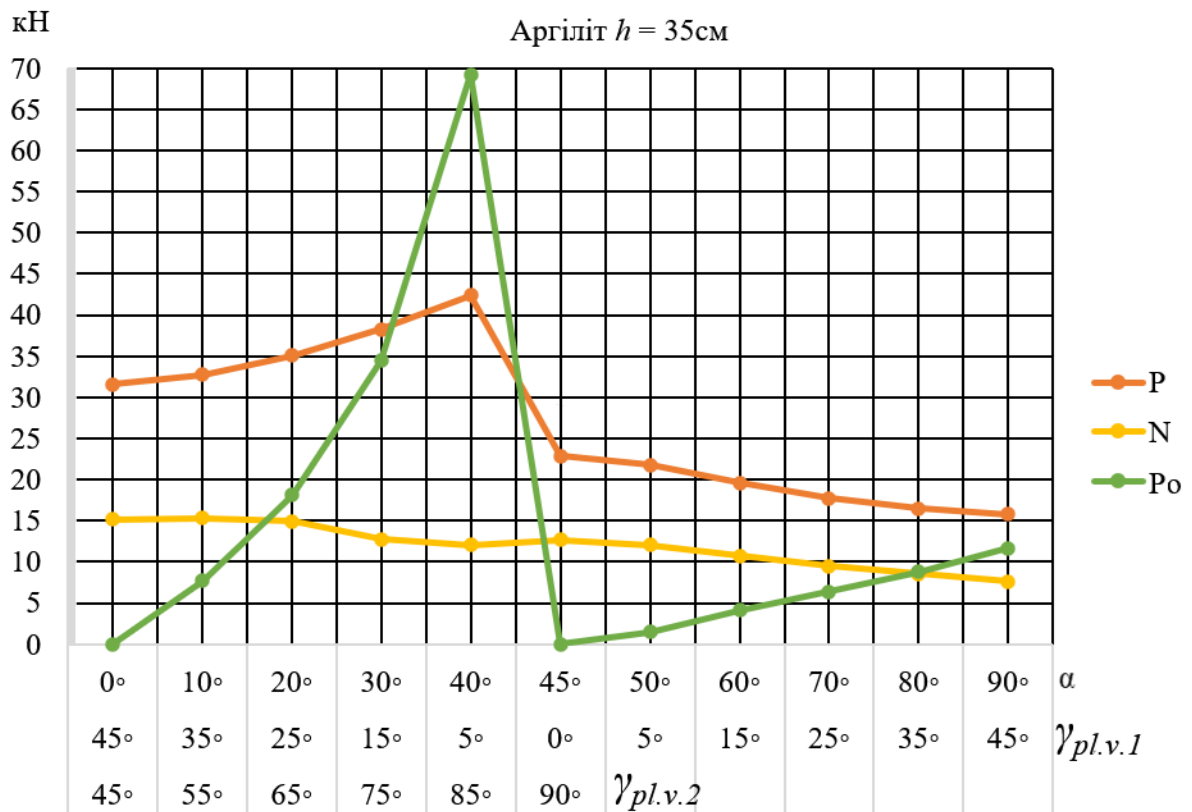


Рисунок 5. Сили різання аргіліту на критичній глибині

Додаток В

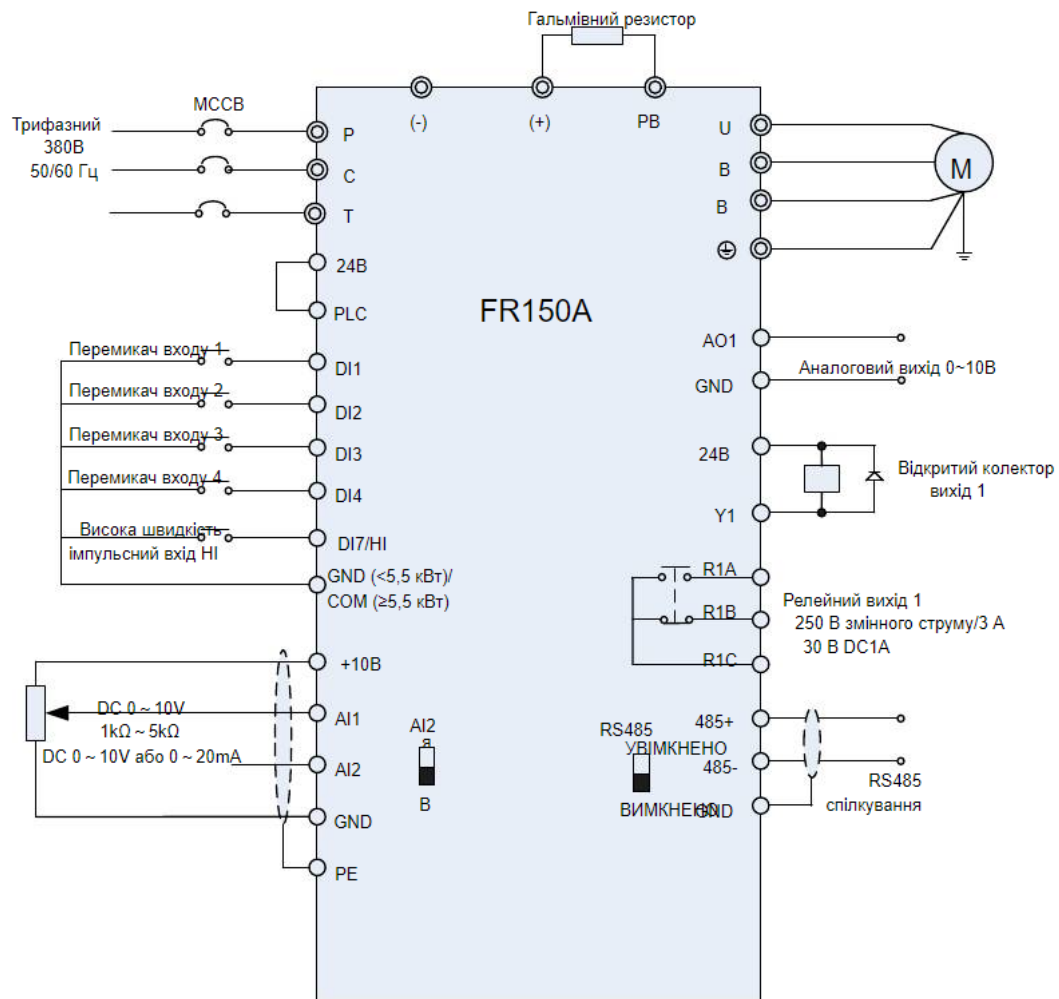


Рисунок. 1. Схема підключення трифазного інвертора «Freson» 380 В

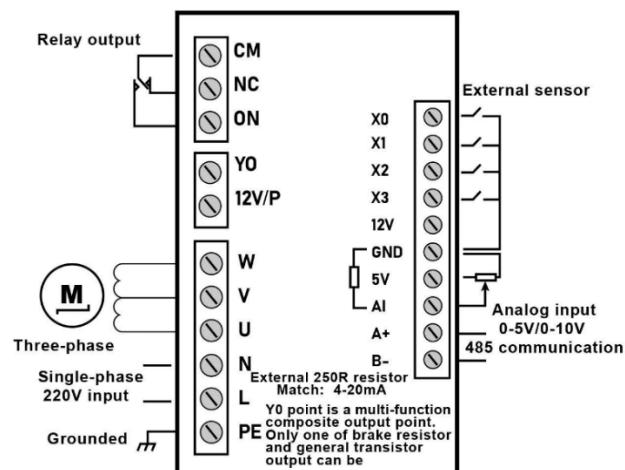
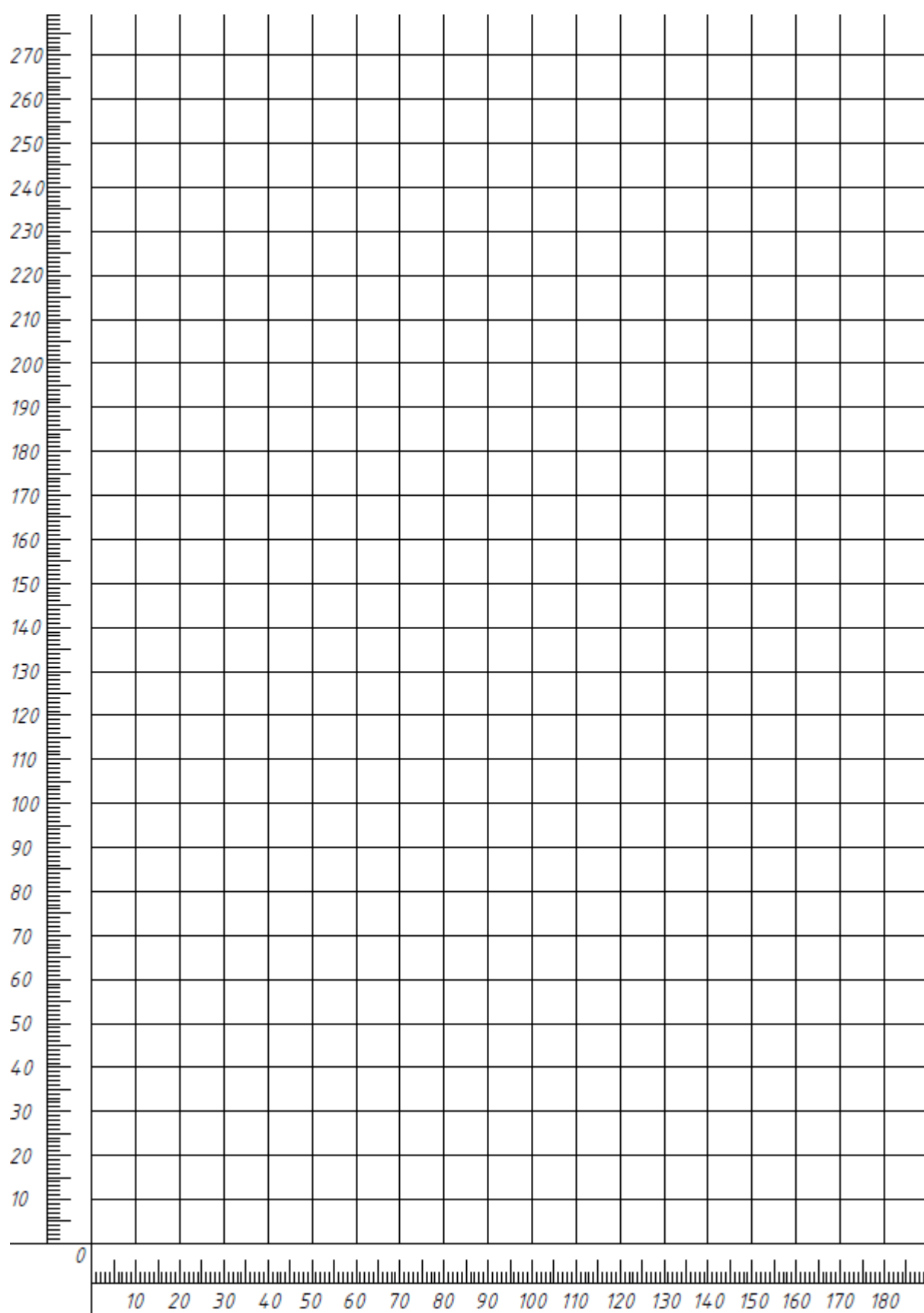
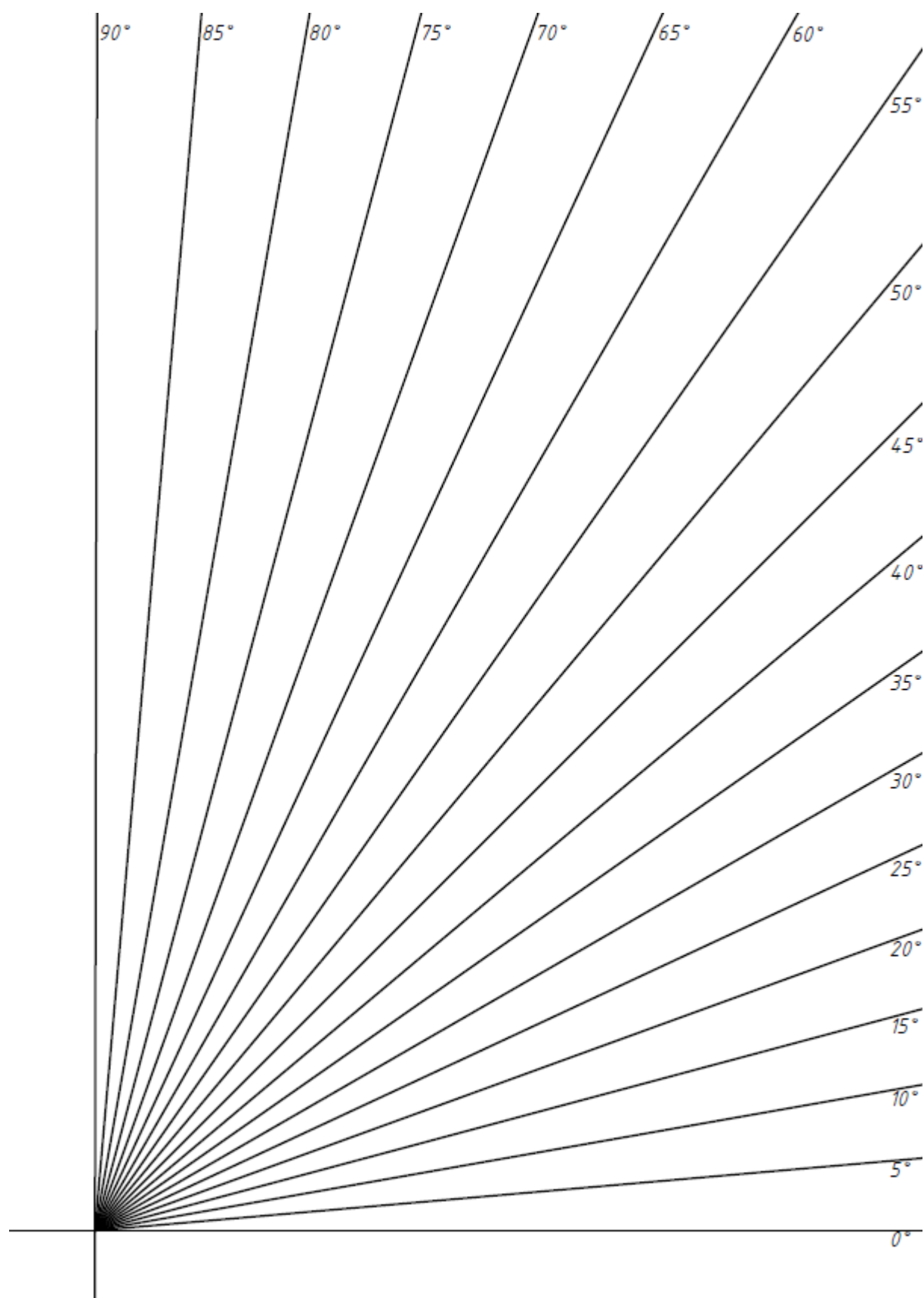


Рисунок 2. Схема підключення однофазного інвертора «Suswe» 220 В

Додаток Г



Продовження додатку В



Додаток Д

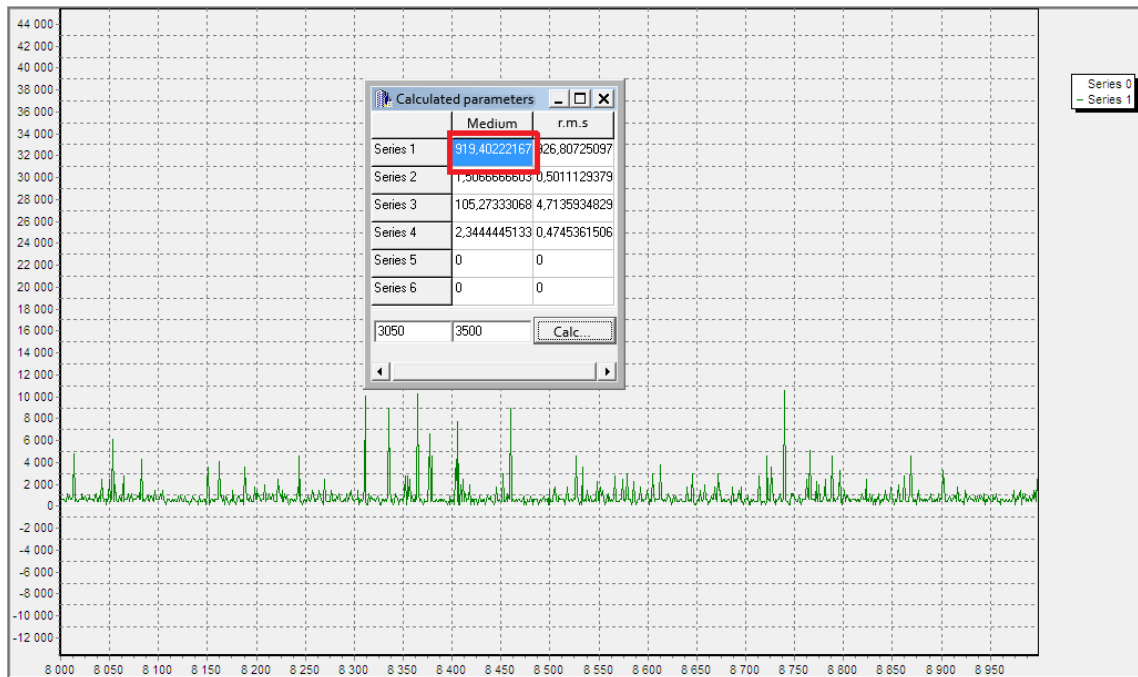


Рисунок 1. Осцилограма сил різання ґрунту ІІІ категорії при куті напрямку сил різання $\alpha = 0^\circ$

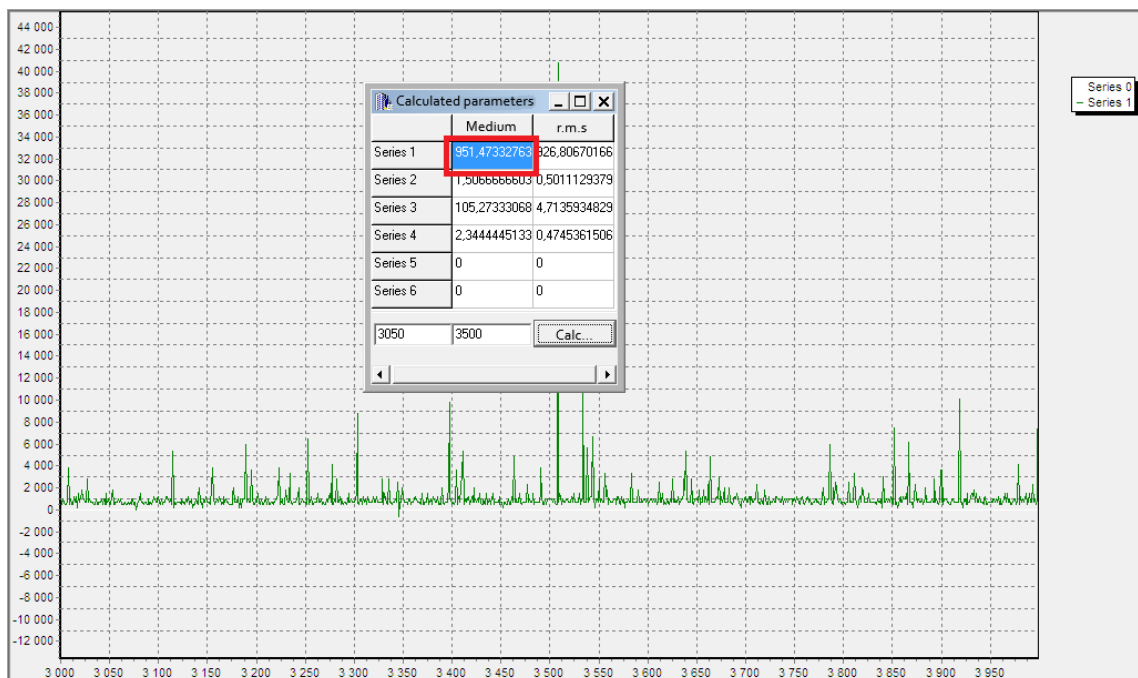


Рисунок 2. Осцилограма сил різання ґрунту ІІІ категорії при куті напрямку сил різання $\alpha = 20^\circ$

Продовження додатку Д

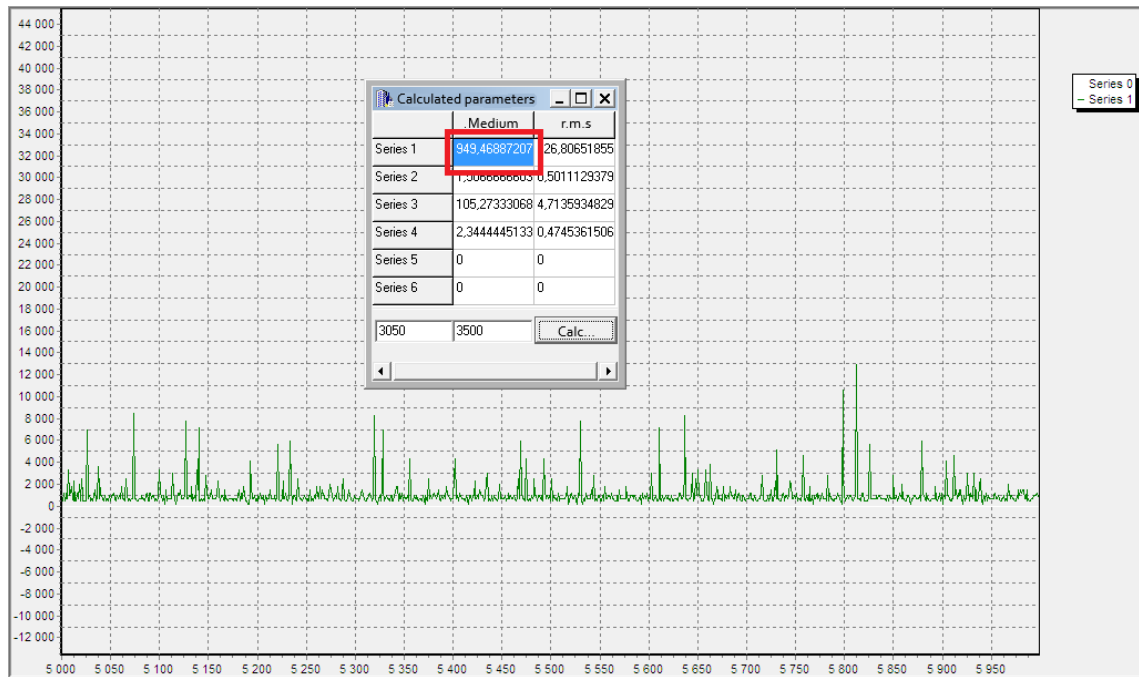


Рисунок 3. Осцилограма сил різання ґрунту ІІІ категорії при куті напрямку сил різання $\alpha = 40^\circ$

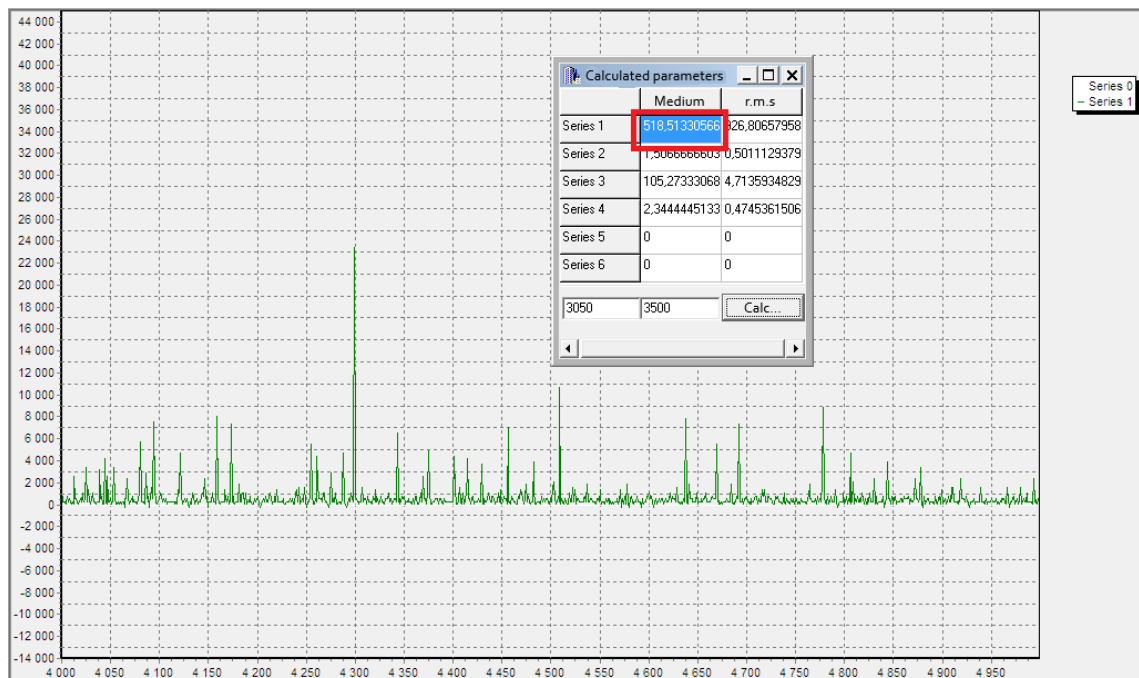


Рисунок 4. Осцилограма сил різання ґрунту ІІІ категорії при куті напрямку сил різання $\alpha = 80^\circ$

Продовження додатку Д

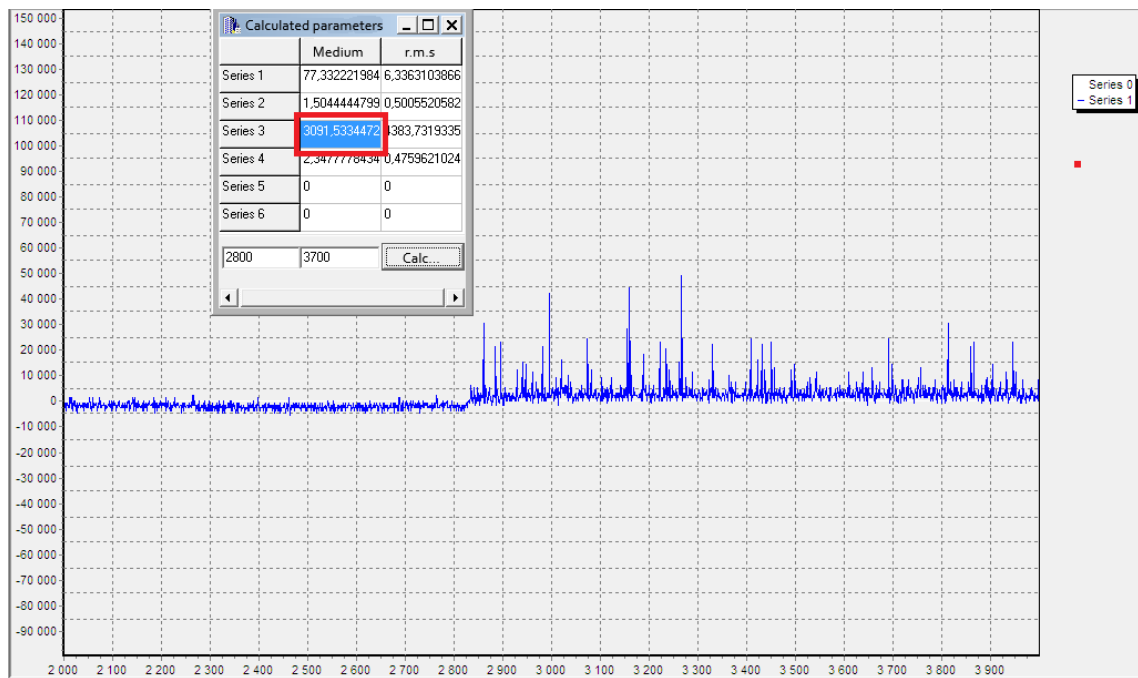


Рисунок 5. Осцилограма сил різання ґрунту IV категорії при куті напрямку сил різання $\alpha = 0^\circ$

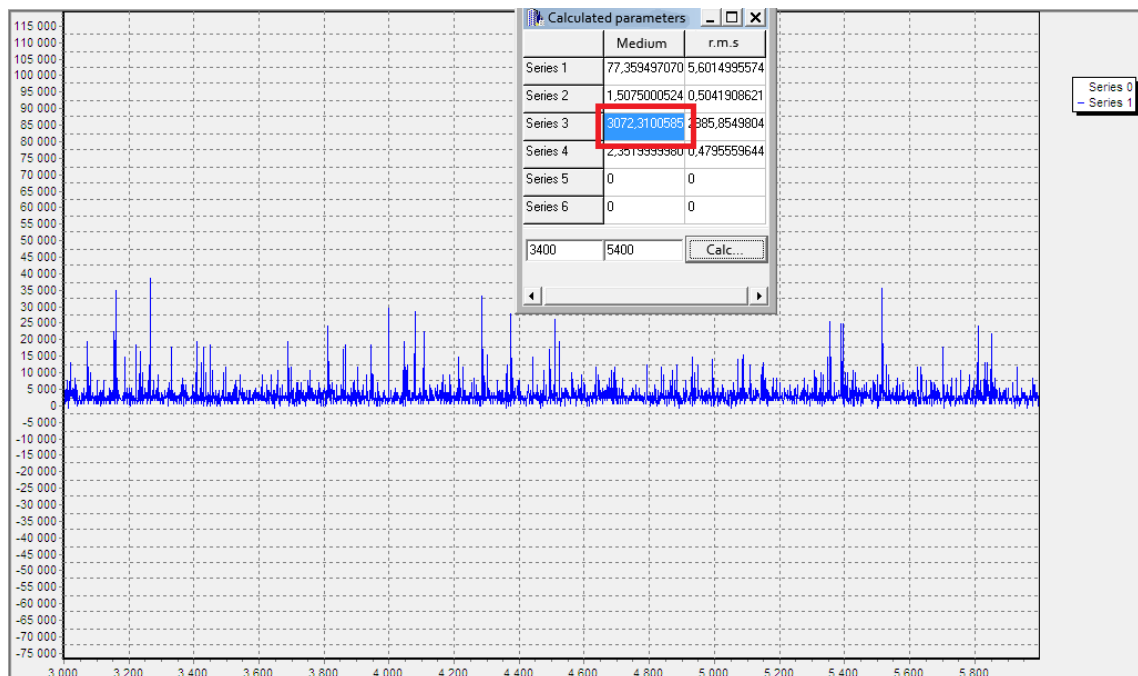


Рисунок 6. Осцилограма сил різання ґрунту IV категорії при куті напрямку сил різання $\alpha = 20^\circ$

Продовження додатку Д

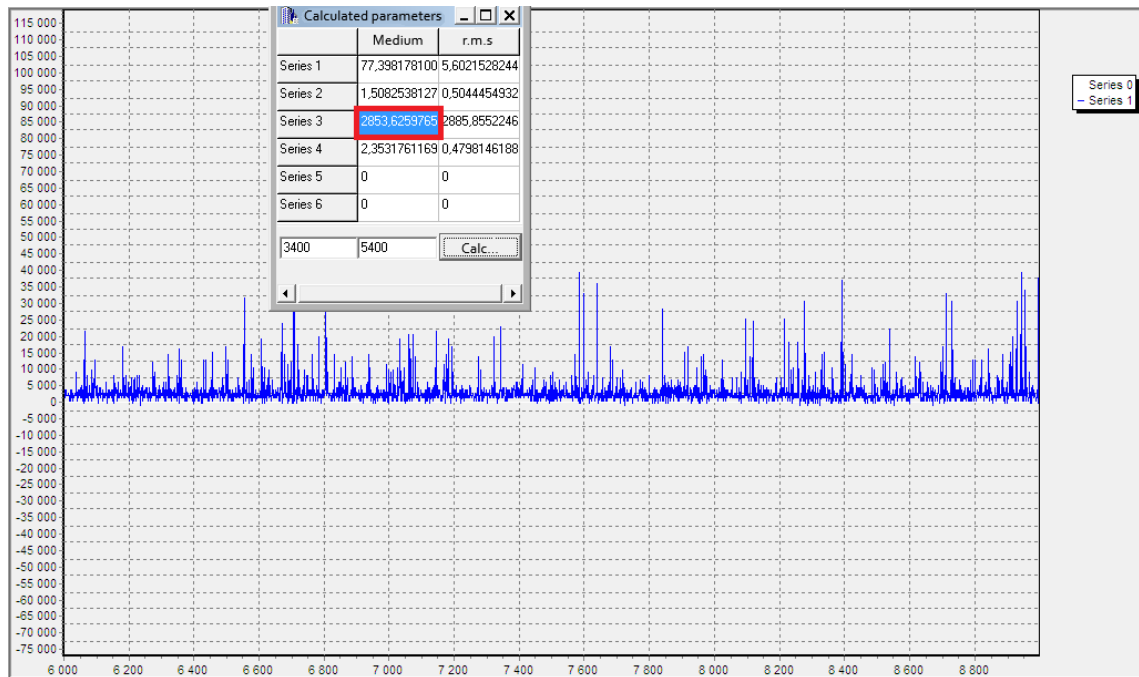


Рисунок 7. Осцилограма сил різання ґрунту IV категорії при куті напрямку сил різання $\alpha = 40^\circ$

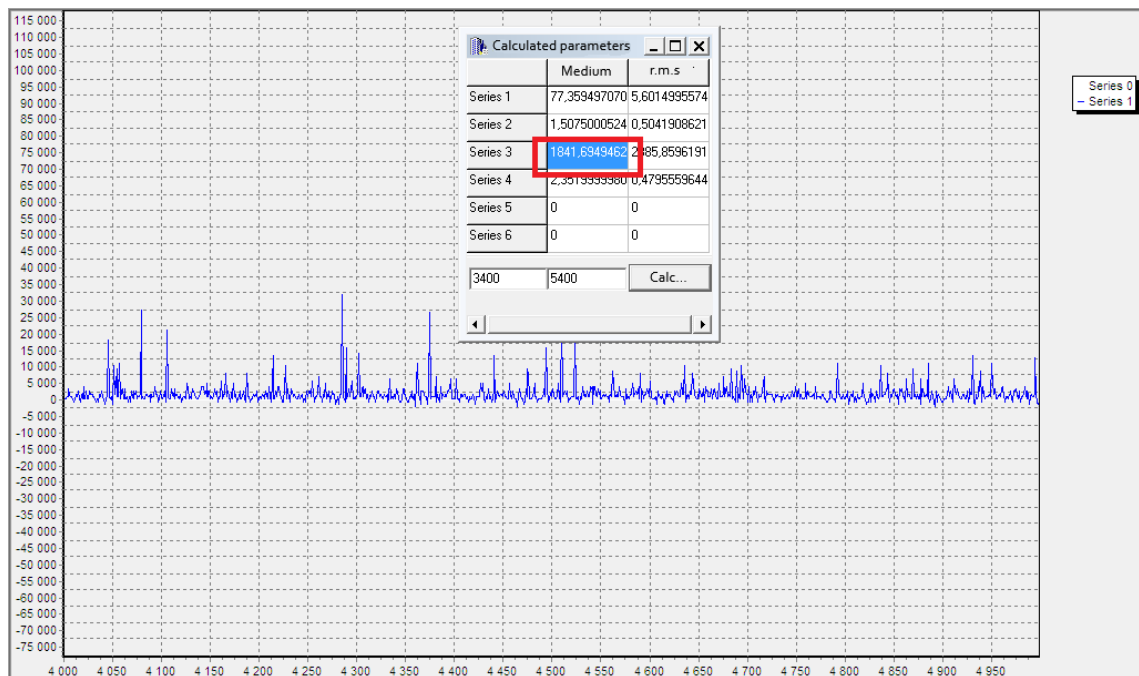


Рисунок 8. Осцилограма сил різання ґрунту IV категорії при куті напрямку сил різання $\alpha = 80^\circ$

Продовження додатку Д

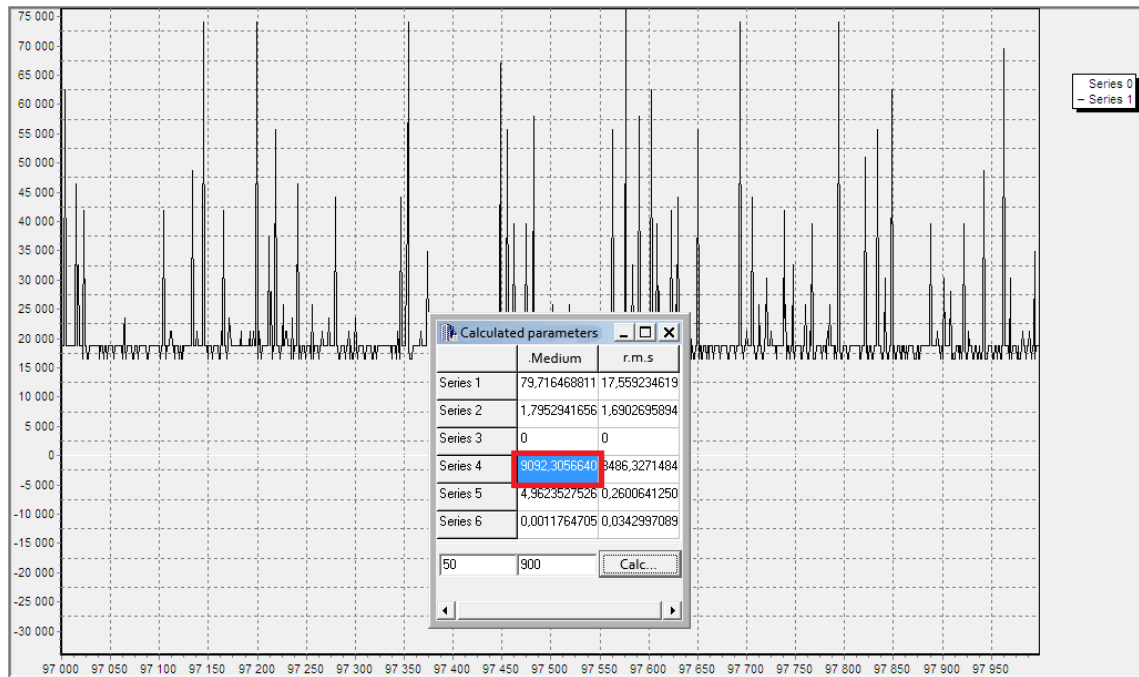


Рисунок 9. Осцилограма сил різання ґрунту V категорії при куті напрямку сил різання $\alpha = 0^\circ$

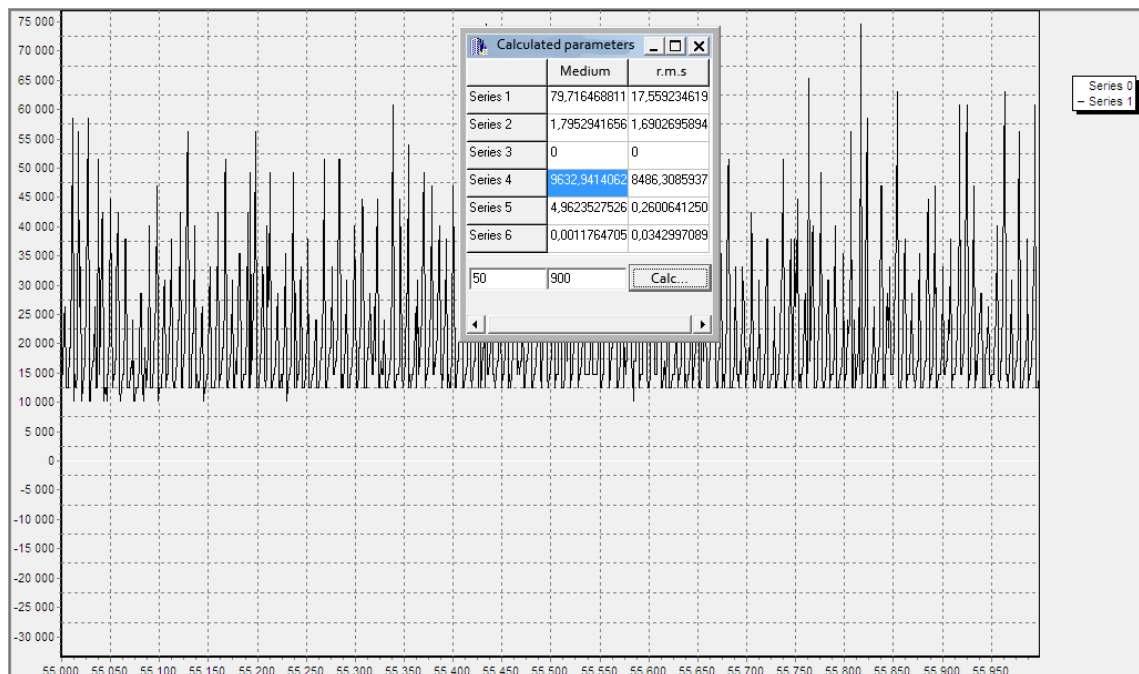


Рисунок 10. Осцилограма сил різання ґрунту V категорії при куті напрямку сил різання $\alpha = 20^\circ$

Продовження додатку Д

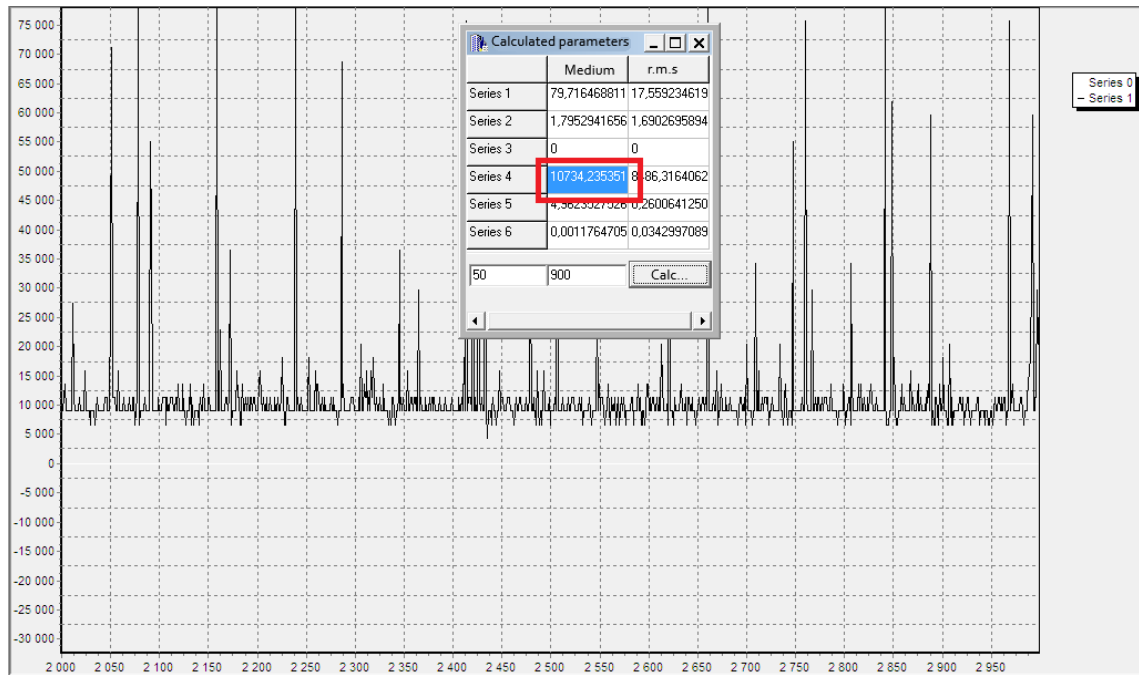


Рисунок 11. Осцилограма сил різання ґрунту V категорії при куті напрямку сил різання $\alpha = 40^\circ$

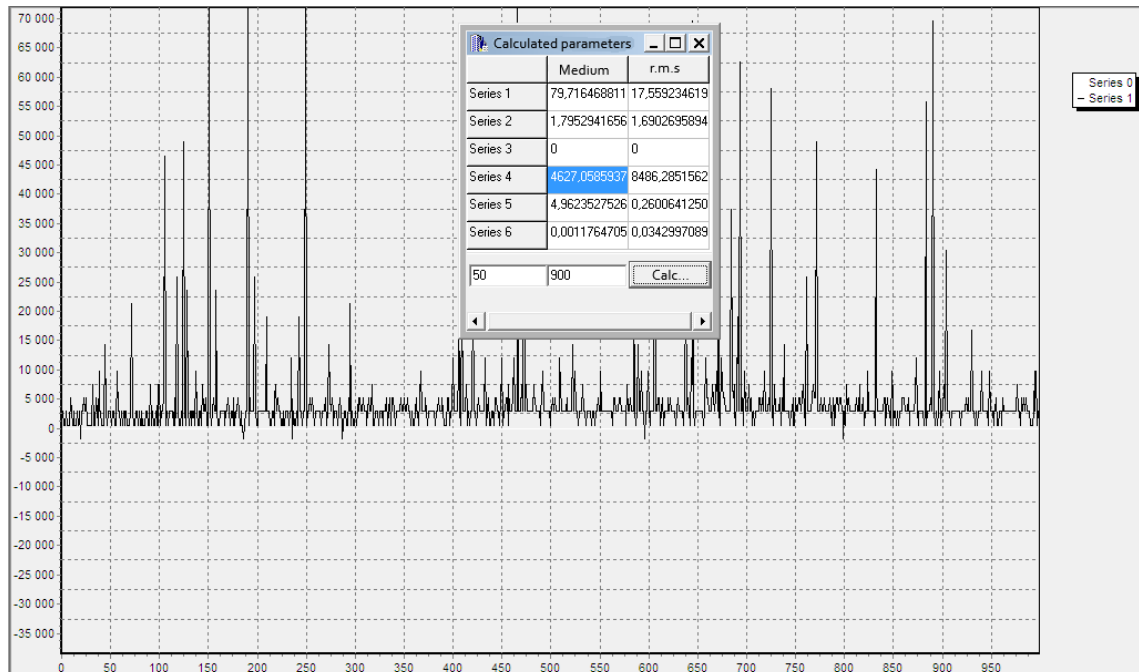


Рисунок 12. Осцилограма сил різання ґрунту V категорії при куті напрямку сил різання $\alpha = 80^\circ$

Додаток Е

На графіках зображено P_1 – це сила різання ґрунту відвалом без просторово орієнтованих ножів, а P_2 – це сила різання ґрунту з просторово орієнтованими рухомими ножами, при різних кутах прикладання сили різання α .

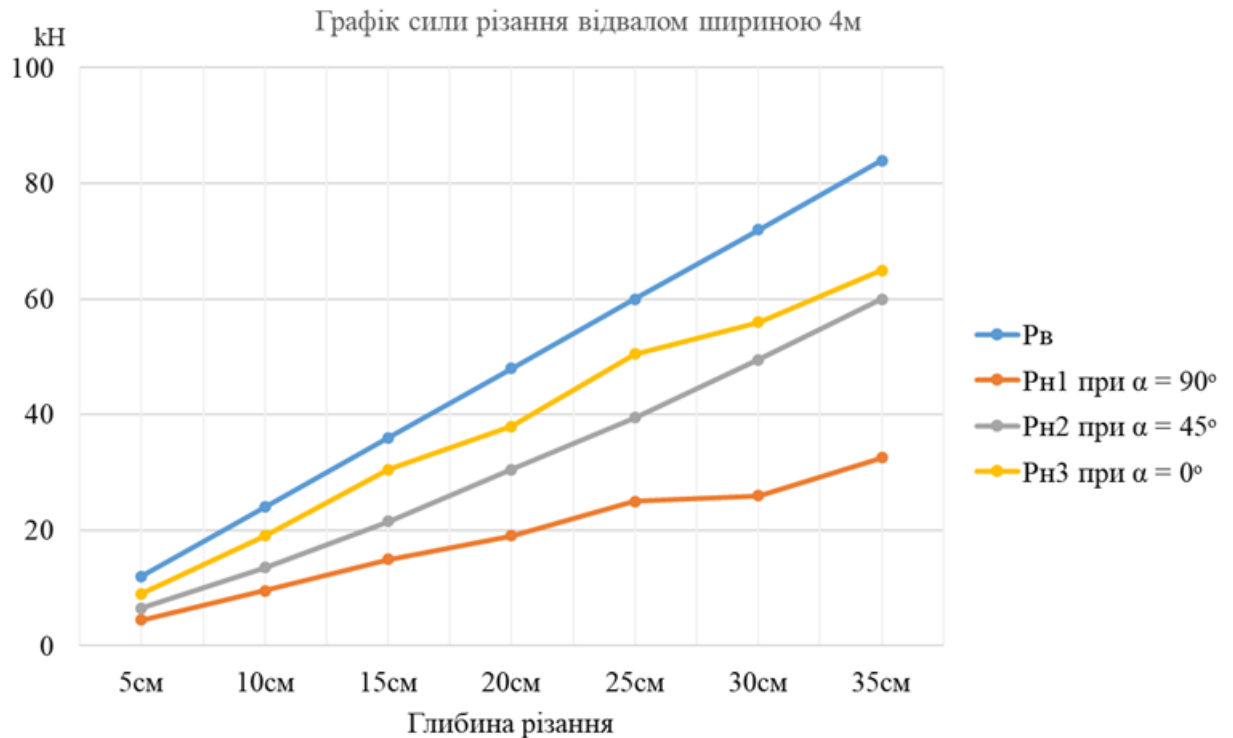


Рисунок 1. Графік сил різання ґрунту відвалом шириною 2 метри.

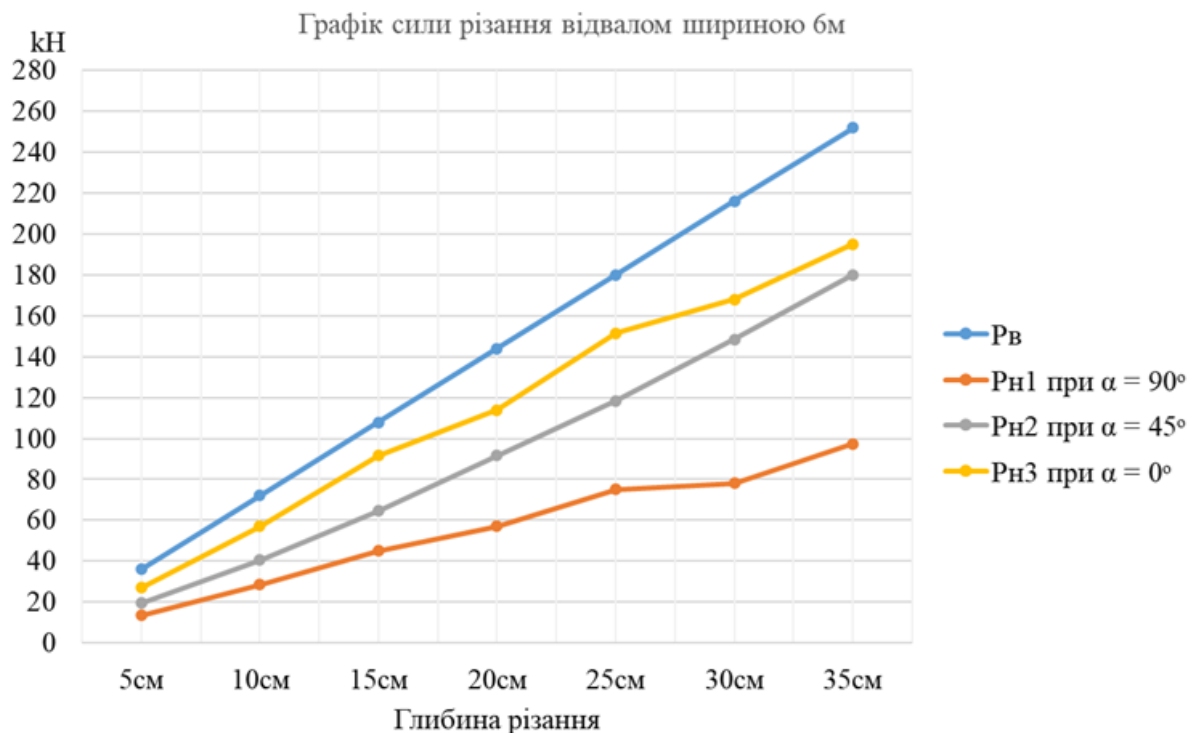


Рисунок 2. Графік сил різання ґрунту відвалом шириною 6 метрів

Додаток Є

КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БУДІВНИЦТВА І АРХІТЕКТУРИ

ФАКУЛЬТЕТ АВТОМАТИЗАЦІЇ І ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

«29» жовтня 2025 р.

ДОВІДКА

про впровадження результатів дослідження
на здобуття наукового ступеня доктора філософії
зі спеціальності 133 Галузеве машинобудування

Запропонована в дисертаційній роботі Федішина Богдана Миколайовича: математична модель рухомих косокутних ножів, розширює розуміння процесу різання ґрунтів, та впливу просторово орієнтованих робочих органів на робоче середовище та продуктивність і енергоємність роботи землерийних машин.

Використана в роботі математична модель розрахунку рухомих косокутних ножів впроваджена в курс «Вступ до фаху» освітньої програми спеціальності G9 – «Прикладна механіка», курс «Вступ до фаху» освітньої програми спеціальностей G11 – «Галузеве машинобудування», в курс «Будівельні машини та обладнання» освітньої програми спеціальності G9 – «Прикладна механіка», курс «Будівельні машини та обладнання» освітньої програми спеціальностей G11 – «Галузеве машинобудування» факультету автоматизації і інформаційних технологій Київського національного університету будівництва і архітектури в 2026-2029 роках.

Це надає можливість впроваджувати необхідні теоретичні знання та практичні навички фахівцям галузі механічної інженерії при вирішенні задач розробки ґрунтів просторово орієнтованими робочими органами землерийних машин і підтверджує актуальність і вагоме теоретичне і практичне значення у процесі підготовки майбутніх спеціалістів галузі механічної інженерії.

декан факультету АІТ,
доктор технічних наук, професор



Олександр ТЕРЕНТЬЄВ