

Харківський національний автомобільно-дорожній університет
Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Гапонов Олексій Олександрович

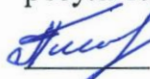
УДК 624.132.3

**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ БАГАТОСКРЕБКОВИХ
ЛАНЦЮГОВИХ ТРАНШЕЙНИХ ЕКСКАВАТОРІВ НА ОСНОВІ
КРИТИЧНОГЛИБИННОГО БЛОКОВАНОГО РІЗАННЯ ҐРУНТІВ**

Спеціальність 133 – Галузеве машинобудування
(галузь знань 13 – Механічна інженерія)

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

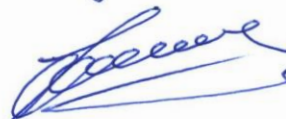
Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

 О.О. Гапонова

Науковий керівник: Супонев Володимир Миколайович, доктор технічних
наук, професор

*Усі примірники дисертації ідентичні за змістом.
Робота спеціалізованої вченої ради ДФ.64.059.001*

Харків – 2021

 В.П. Кирichenko

АНОТАЦІЯ

Гапонов О.О. Підвищення ефективності багатоскребкових ланцюгових траншейних екскаваторів на основі критичноглибинного блокованого різання ґрунтів.

Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 133 – Механічна інженерія (галузь знань 13 – Галузеве машинобудування). – Харківський національний автомобільно-дорожній університет Міністерства освіти і науки України, Харків, 2021.

Дисертацію присвячено вирішенню актуальної науково-прикладної проблеми підвищення ефективності багатоскребкових ланцюгових траншейних екскаваторів за рахунок критичноглибинного різання ґрунтів його різцями.

У дисертаційній роботі обґрунтовано актуальність теми, сформульовано об'єкт, предмет, мету й завдання дослідження, описано методи дослідження, а також визначено зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами та надано інформацію про апробацію і публікації результатів дослідження.

Оскільки розробка ґрунту різцями в умовах критичноглибинного різання дозволяє зменшити енергоємність процесу створення траншей та збільшити продуктивність роботи ланцюгових траншейних екскаваторів, тему цієї дисертаційної роботи слід вважати актуальною.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в розробленні узагальнених теоретичних залежностей, які вперше отримані для визначення основних параметрів робочого органа та режимів роботи ланцюгового траншейного екскаватора, в якого різці працюють в умовах критичноглибинного різання ґрунту. Зокрема вперше одержані такі результати:

– обґрунтовані передумови підвищення ефективності роботи ланцюгових траншейних екскаваторів за рахунок критичноглибинного різання ґрунту та визначено довжину лемеша крайніх бокових різців для цих умов;

– визначені основні параметри робочого органа та режими роботи екскаватора, а саме: відстань між суміжними ґрунторозробними органами, число ліній різання і кількість різців, що знаходяться в забої, висоту скребків, швидкість різання та подачі, продуктивність, сумарну силу різання та інші;

– розроблена методика проведення експериментальної перевірки теоретичних положень та створені натуральні зразки різців робочого органа та їх комбінації для випробування їх у ґрунтовому каналі та польових умовах;

– розроблено алгоритм інженерних розрахунків та побудовані номограми для визначення режимів роботи та основних параметрів екскаваторів у залежності від геометричних параметрів різців, параметрів траншеї та ґрунтових умов;

– розрахунками підтверджено економічну ефективність від модернізації ланцюгових траншейних екскаваторів з критичноглибинним різанням ґрунту різцями за рахунок зменшення енергетичних витрат на процес розробки ґрунту та підвищення продуктивності розриття траншеї і темпів виконання робіт із прокладання підземних інженерних комунікацій.

Ефективність роботи ланцюгово-скребкових екскаваторів забезпечується мінімальною енергоємністю робочого процесу та максимальною продуктивністю машини, які, у свою чергу, залежать від форми різців, їх розставляння та кількості.

Відомо, що енергоємність робочого процесу зменшується зі збільшенням глибини різання ґрунту ножем до критичної глибини, тому що інтенсивність зростання опору різанню менша площі поперечного перерізу прорізу. Опір ґрунту різанню ножем збільшується при закритичному різанні за рахунок пресування ґрунту в бічні стінки прорізу, а через неможливість впливу на процес руйнування ґрунту денної поверхні площа зони руйнування

залишається незмінною. В результаті підвищується енергоємність робочого процесу.

Аналітичні та експериментальні моделі взаємодії багатоскребкових ланцюгових траншейних екскаваторів з ґрунтом, які існують на цей час, не визначають технологічні параметри машини з урахуванням різання різцями ґрунту на критичній глибині. Так, наявні рекомендації щодо проєктування машин не забезпечують мінімальну енергоємність та максимальну продуктивність робочого процесу.

З метою визначення геометричних параметрів лемеша, що здійснює блоковане асиметричне різання ґрунту, розглянуто характерну форму тіла сколу ґрунту для цього випадку та діючі на нього сили під час взаємодії з ґрунтом. З отриманих розрахункових залежностей встановлено, що відносна довжина лемеша залежить від фізико-механічних властивостей ґрунтів і схеми та кута різання різців. Таким чином, зі зміною кута різання різців від 20° до 50° відносна довжина лемешів зменшується: для схеми блокованого асиметричного різання боковими крайніми різцями від 3,52 до 1,63 для напівтвердих суглинку та глини та від 2,52 до 0,93 для твердого супіску; для схеми напівблокованого різання середніми різцями від 33,3 до 6,66 для напівтвердих суглинку та глини та від 47,2 до 7,27 для твердого супіску; для схеми напівблокованого різання боковими крайніми різцями від 1,8 до 1,5 для напівтвердої глини, від 1,33 до 1,12 для напівтвердого суглинку і від 0,87 до 0,66 для твердого супіску.

Отримані в роботі залежності щодо визначення критичноглибинних сил різання ґрунту та енергоємності процесу розриття траншеї ланцюгово-скребковим екскаватором безперервної дії надають можливість удосконалити розрахунки, створити комплексну методику щодо розрахунку машини. В основі цієї методики закладені принципи найбільш ефективного напівблокованого та блокованого різання ґрунту різцями робочого органа екскаватора. Встановлено, що енергоємність робочого процесу приймає мінімальні значення при кутах різання різців $\alpha_p = 20\text{--}30^\circ$, проте зі збільшенням

ширини траншеї прямо пропорційно зростає. Також зі збільшенням ширини різців енергоємність зменшується.

На критичній глибині різання питома сила копання чисельно дорівнює енергоємності розробки одного кубічного метра ґрунту та для ґрунту II категорії (напівтвердий суглинок) змінюється від 147,7 кПа для $\alpha_p = 20^\circ$ до 225,8 кПа для $\alpha_p = 50^\circ$.

У роботі визначені умови ефективного розвантаження та встановлені параметри залежності зміни шляху переміщення ґрунту по поверхні розвантажувальних скребків від часу розвантаження, а також залежності швидкості блокованого різання від ширини траншеї з подальшим обґрунтуванням ефективних режимів роботи багатоскребкових екскаваторів та ширини їх крайніх бокових різців. У дослідженні встановлено технічну продуктивність екскаватора на основі визначення виносної здатності ґрунту однієї групи різців, що працюють в умовах критичної глибини різання ґрунтів з урахуванням їхніх фізико-механічних властивостей. Визначені умови дозволили встановити ширину крайніх бокових різців, що здійснюють блоковане асиметричне різання ґрунтів.

Встановлено, що час розвантаження ґрунту із скребків практично не залежить від їх кутової швидкості приводної зірочки ланцюга в межах її зміни 5–9 рад./хв у зоні розвантаження. Водночас зі збільшенням ширини ножа, наприклад з 0,02 м до 0,03 м, під час копання траншеї в суглинку вимагає зменшення швидкості різання в 1,5 рази.

Розрахункові залежності для розрахунку технічної продуктивності екскаватора були отримані на основі визначення виносної здатності ґрунту однієї групи різців, що працюють в умовах критичної глибини різання. Це надало можливість встановити ширину крайніх бічних різців, що здійснюють блоковане асиметричне різання. Наприклад, для напівтвердого суглинку вона повинна бути більшою за ширину середніх різців.

Отримані результати враховують як технологічні аспекти роботи екскаватора, так і фізико-механічні властивості ґрунтів, що розробляються

різцями в умовах критичної глибини їх різання. Це відрізняє проведені в роботі дослідження від попередніх. Отримані розрахункові залежності дають можливість враховувати та аналізувати основні фактори, що впливають на процеси розробки траншеї та обґрунтувати параметри машини та її робочого обладнання, які забезпечують мінімальну енергоємність та максимальну продуктивність роботи екскаватора з урахуванням фізико-механічних властивостей ґрунтів.

Отже, можна стверджувати, що прикладним аспектом використання отриманого наукового результату є можливість удосконалення робочого обладнання для створення більш ефективних скребкових траншейних екскаваторів. Зниження енерговитрат та підвищення продуктивності є важливими технічними показниками, що визначають собівартість не тільки копання траншеї, але й загалом прокладання лінійно-протяжних ділянок розподільних підземних комунікацій.

Практичне значення результатів, отриманих у роботі, полягає в розробці методики та створенні алгоритму визначення параметрів і режимів роботи ланцюгово-скребкових траншейних екскаваторів на основі критичноглибинного різання ґрунтів. На основі отриманих інженерних розрахунків складено технічне завдання на модернізацію екскаватора ЕТЛ-208, яке запроваджене ТОВ «НВП «Газтехніка ЛТД» у виробництво. Машина використовується під час розробки траншей для прокладання підземних комунікацій спеціалізованою будівельною компанією «Харківспецбуд-1».

Результати досліджень використовуються в навчальному процесі при викладанні лекцій, виконанні практичних, лабораторних робіт та курсового проєктування з дисциплін «Машини для земляних робіт», «Динаміка будівельних і дорожніх машин» для студентів освітнього рівня навчання «бакалавр» та «магістр» галузі знань 13 «Галузеве машинобудування» зі спеціальності 133 – «Механічна інженерія».

Ключові слова: скребок, копання траншеї, скребковий екскаватор, траншейний екскаватор, критична глибина, різець, різання ґрунту.

ABSTRACT

Gaponov O.O. Improving the efficiency of multi-scraper chain trench excavators based on critical depth soil blocked cutting.

The dissertation for competition for a scientific degree of the Doctor of Philosophy on specialty 05.05.04 – Equipment for earth, road and forestry works (13 – Mechanical engineering). – Kharkiv National Automobile and Highway University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkiv, 2021.

The dissertation is devoted to the solution of the topical scientific and applied problem of increasing efficiency of multi-scraper chain trench excavators at the expense of critical depth soil cutting with its cutters.

The dissertation substantiates the relevance of the topic, formulates the object, subject, purpose and objectives of the study, describes the research methods, as well as the association of the paper with the scientific programs, plans, and topics. It also provides information on testing and publication of research results.

Since the soil development with cutters in conditions of critical depth cutting can reduce energy consumption of the trenching process and increase the productivity of chain trench excavators, the topic of this dissertation should be considered relevant.

The scientific novelty of the obtained results lies in the development of generalized theoretical dependences, which were first obtained to determine the basic parameters of the working body and operation modes of a chain trench excavator whose cutters work in conditions of critical depth cutting. In particular, the following results were obtained for the first time:

- the preconditions for increasing the efficiency of chain trench excavators due to critical depth soil cutting are substantiated and the length of the ploughshare of the extreme side cutters for these conditions is determined;

- the main parameters of the working body and the operation modes of the excavator are determined, which are: the distance between adjacent ground-excavating bodies, the number of cutting lines and the number of cutters in the face,

the height of the scrapers, the speed of cutting and feeding, cutting strength and others;

- the technique of carrying out experimental check of theoretical positions is developed and natural samples of a working body cutters and their combinations for the test in the soil channel and in field conditions are created;

- the algorithm of engineering calculations is developed and the nomograms for definition of the basic parameters and operating modes of excavators depending on geometrical parameters of cutters, parameters of a trench and soil conditions are built;

- the calculations confirm the economic efficiency of modernization of chain trench excavators with critical depth soil cutting due to the reduced energy costs of the process of soil development and increased productivity of trenching and the pace of work on laying underground utilities.

The efficiency of chain-scraper excavators is ensured by the minimum energy consumption of the working process and the maximum productivity of the machine, which in turn depend on the shape of the cutters, their number and arrangement.

It is known that when the depth of soil cutting with blades increases to critical, the energy consumption of the working process multiplies, because the intensity of the increasing resistance to cutting is less than the cross-sectional area of the cut. In supercritical cutting, the resistance of the soil to cutting with a blade increases due to the soil pressing into the side walls of the cut, and the area of the fracture zone remains unchanged because it is impossible to affect the process of soil destruction of the day surface. As a result, energy consumption of the work process gets bigger.

The existing analytical and experimental models of interaction of multi-scraper chain trench excavators with soil do not determine the technological parameters of the machine considering soil cutting with the cutters at the level of critical depth. Thus, the existing recommendations for the design of machines do not provide the minimum energy consumption and maximum productivity of the work process.

In order to determine the geometric parameters of the ploughshare, which performs asymmetric blocked soil cutting, the characteristic shape of the body of the chipped soil for this case and the forces acting on it when interacting with the soil were considered. From the obtained calculated dependences it was found that the relative length of the ploughshare depends on the scheme and cutting angle of the cutters and the physical and mechanical properties of the soil. Thus, when changing the cutting angle of the cutters from 20° to 50° , the relative length of the ploughshares decreases: for the scheme of asymmetric blocked cutting with extreme side cutters from 3.52 to 1.63 for semi-hard loam and clay and from 2.52 to 0.93 for hard sand; for the scheme of semi-blocked cutting with medium cutters from 33.3 to 6.66 for semi-hard loam and clay and from 47.2 to 7.27 for hard sand; for the scheme of semi-blocked cutting with extreme side cutters from 1.8 to 1.5 for semi-hard clay, from 1.33 to 1.12 for semi-hard loam and from 0.87 to 0.66 for hard sand.

The dependences obtained in determining the critical depth forces of soil cutting and energy consumption of the trench digging process with a continuous scraper excavator provide an opportunity to supplement the calculations and create a comprehensive method of calculating the machine based on the principles of the most effective soil destruction of blocked and semi-blocked soil cutting by cutters of the working body of the excavator. It is established that the energy intensity of the working process takes the minimum values at the cutting angles of the cutters $\alpha_p = 20\text{--}30^\circ$, increasing in direct proportion with the increase of the trench width. Also, the energy consumption decreases with the increasing width of the cutters.

The specific digging force (at the critical depth of cut) is numerically equal to the energy consumption of one cubic meter of soil and for semi-hard loam (category II soil) varies from 147.7 kPa for $\alpha_p = 20^\circ$ to 225.8 kPa for $\alpha_p = 50^\circ$.

To substantiate the efficient modes of operation for many scraper excavators and the width of their extreme side cutters, the conditions of effective unloading were determined and the parameters of the dependence of the change of soil movement on the surface of unloading scrapers on the unloading time were

established. For the same purpose, the dependences of the speed of blocked cutting on the width of the trench were determined. After that, the technical performance of the excavator was found on the basis of determining the bearing capacity of the soil of one group of cutters operating in conditions of critical depth of soil cutting, taking into account the physical and mechanical properties of the soil. The determined conditions allowed establishing the width of the extreme side cutters that carry out asymmetric blocked cutting of soils.

It was established that the time of soil unloading from scrapers virtually does not depend on the angular velocity of the drive sprocket of the chain within its change within 5–9 rad/min in the unloading area. At the same time, increasing the width of the knife, for example, from 0.02 m to 0.03 m when digging a trench in the loam requires reduction in cutting speed by 1.5 times.

The obtained calculation dependences for calculating the technical productivity of the excavator were obtained by determining the bearing capacity of the soil of one group of cutters operating in critical cutting depth, which made it possible to establish the width of the extreme side cutters performing asymmetric blocked cutting. For example, for semi-hard loam, it should be larger than the width of the middle cutters.

The obtained results take into account both the technological aspects of the excavator operation and the physical and mechanical properties of the soils developed by the cutters in the conditions of the critical depth of their cutting. This distinguishes the research conducted in the paper from the previous ones. The obtained calculated dependences make it possible to consider and analyze the main factors affecting the processes of trench development and substantiate the parameters of the machine and its working equipment, which provide minimum energy consumption and maximum productivity of the excavator taking into account physical and mechanical properties of soils.

Thus, it can be affirmed that an applied aspect of the use of the obtained scientific result is the possibility to improve the working equipment for designing more efficient scraper trench excavators. Reducing energy consumption and

increasing productivity are important technical indicators that determine the cost of not only digging a trench, but also of laying linear-long sections of underground distribution utilities on the whole.

The practical significance of the obtained results of the work includes the development of a methodology and creation of algorithm for determining the parameters and operating modes of chain-scraper trench excavators on the basis of critical deep cutting of soils. On the basis of the received engineering calculations the technical task for modernization of the ETC-208 excavator which was accepted in production by LLC SPE «Gaztekhnika LTD» and LLC SKTB «Hydromodul» was made. The machine was used in the development of trenches for laying underground communications by a specialized construction company «Kharkivspetsbud-1».

The results of the research are used in the educational process, in particular, in lectures, practical classes, laboratory works and course designing in the disciplines «Earth-moving machines», «Dynamics of construction and road machines» for the students of bachelor and master educational levels in knowledge area 13 «Industrial Engineering» in specialty 133 – «Lifting and transport, construction, road, reclamation machines and equipment».

Key words: trench digging, trench excavator, scraper excavator, scraper, cutter, critical depth, soil cutting.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Публікації у фахових виданнях України

1. Кравець С.В., Супонєв В.М., Гапонов О.О., Бундза О.З. Визначення довжини лемеша та сили різання ґрунту (зубами) траншейних екскаваторів. Вестник ХНАДУ: сб. науч. тр. 2020. Вип. 88, т 2, С. 78–84. (Особистий внесок здобувача: складено розрахункову схему для визначення довжини лемеша та різання ґрунту при критично глибинному блокованому різанню ґрунту різцями ланцюгового екскаватора).

2. Кравець С.В., Супонєв В.М., Гапонов О.О. Визначення критично-глибинних сил різання ґрунтів та енергоємності ланцюгово-скребкових траншейних екскаваторів. Вестник ХНАДУ: сб. науч. тр. 2021. Вип. 92, т. 1. С. 192–199. (Особистий внесок здобувача: отримано розрахункову залежність для визначення сил критичноглибинного різання ґрунту з урахуванням блокованого різання ґрунту крайніми різцями та розроховано енергоємність процесу).

*Публікації у періодичних наукових виданнях держав, які входять до
Організації економічного співробітництва та розвитку, що входять до
міжнародних наукометричних баз Scopus або Web of Science*

3. Kravets S., Suponyev V., Goponov O., Kovalevskyi S. Koval A. Determination efficient operating models and sizes of blades for multi-scraper trench excavators. Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2020. № 4/1(106). С. 23–28. DOI: 10.15587/1729-4061.2020.208957. (Особистий внесок здобувача: виконано розрахунки параметрів різців екскаватора, які працюють в режимі критично глибинного блокованого різання ґрунту).

4. Кравець С.В., Супонєв В.М., Гапонов О.О., Бундза О.З. Визначення робочої швидкості, швидкості подачі та швидкості різання ланцюгово-скребковими траншеєкопачами, що здійснюють критично глибинне різання ґрунту. The 1st International scientific and practical conference «Dynamics of the development of world science», September 25–27. 2019. Perfect Publishing, Vancouver. С. 328–334. (Особистий внесок здобувача: отримано

розрахункові моделі для визначення швидкості подачі та різання ґрунту робочим обладнанням ланцюговоскребкових екскаваторів).

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

5. Супонєв В.М., Гапонов О.О., Косяк О.В. Обумовлення параметрів та критично глибинних режимів роботи багато скребкових екскаваторів «Підвищення ефективності піднімально-транспортних, будівельних, дорожніх машин і комплексів»: тези доповідей міжнародної науково-практичної конференції – Дніпро: 2018. С. 33–34.

6. Кравець С.В., Лук'янчук О.О., Гапонов О.О., Косяк О.В. Визначення критичної глибини різання ґрунту боковими різцями (зубами) траншейних екскаваторів. Збірник наукових праць II Міжнародної українсько-азербайджанської конференції. «Building Innovations – 2019», 23–24 травня 2019 р. Полтава: ПолтНТУ, 2019. С. 97–99.

7. Супонєв В.М., Гапонов О.О. Встановлення ефективних режимів роботи багато скребкових траншейних екскаваторів з критично-глибинними різцями // II Міжнародна науково-практична конференція «Комп'ютерні технології і мехатроніка» (28 травня 2020 р.), ХНАДУ, 2020. 391-393 с.

8. Кравець С.В., Супонєв В.М., Гапонов О.О. Визначення енерговитрат роботи скребкового екскаватора в умовах критично глибинного різання ґрунту різцями. VI міжнародна науково-практична конференція «Трансфер інноваційних технологій 2020», 20–21 травня 2020 р. Київ, КНУБА, 2020. С. 71–73.

Публікації, які додатково відображають наукові результати дисертації

9. Гапонов О.О. Встановлення технічної продуктивності ланцюгового екскаватора з різцями, що працюють в умовах критичноглибинного різання ґрунтів. Transfer of Innovative Technologies, 2021, 4(1), 78–81. <https://doi.org/10.32347/tit2141.0210>

10. Гапонов О.О., Косяк О.В., Пухтаєвич О.І. Передумови створення критично-глибинних режимів роботи багатоскребкових ланцюгових траншейних екскаваторів / Строительство. Материаловедение.

Машиностроение. – 2018. №103, с.145-152. (Особистий внесок здобувача: виконано огляд досліджень роботи ланцюгових екскаваторів та проведений їх аналіз).

11. Кравець С.В., Гапонов О.О., Косяк О.В., Янчик Т.О. Визначення числа ліній різання та висоти ґрунтотранспортуючих скребків ланцюгово-скребкових траншейних екскаваторів. Будівництво, матеріалознавство, машинобудування. Інтенсифікація робочих процесів будівельних та дорожніх машин. Серія: Підйомно-транспортні, будівельні та дорожні машини і обладнання // Зб. наук. пр. № 107. Дніпро : ДВНЗ «ПДАБА», 2019. с. 66-74. (Особистий внесок здобувача: виконано розрахунок числа ліній різання та висоти ґрунтотранспортуючих скребків ланцюгово-скребкових траншейних екскаваторів).

12. Кравець С.В., Лук'янчук О.В., Супонев В.М., Гапонов О.О. Методика розрахунку параметрів скребкового робочого органу траншейного екскаватора на основі критичноглибинного різання ґрунтів. Гірничі, будівельні, дорожні і меліоративні машини. Київ, КНУБА, 2020. №96. С. 5–12. (Особистий внесок здобувача: додані до інженерної методики розрахунку ланцюгово-скребкових траншейних екскаваторів розрахункові залежності, які враховують критично глибинне різання ґрунту з урахуванням блокованого різання крайніми боковими різцями).

ЗМІСТ

ВСТУП.....	18
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ПЕРЕДУМОВ СТВОРЕННЯ КРИТИЧНО-ГЛИБИННИХ РЕЖИМІВ РОБОТИ БАГАТОСКРЕБКОВИХ ЛАНЦЮГОВИХ ТРАНШЕЄКОПАЧІВ. МЕТА ТА ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ	23
1.1. Огляд сучасних багатоскребкових ланцюгових траншейних екскаваторів	23
1.2. Аналіз схем розставляння та форми ґрунторозробних і транспортувальних елементів на ланцюгово-скребкових робочих органах траншейних екскаваторів.....	28
1.3. Аналіз досліджень і теоретичних передумов для створення китичноглибинних режимів роботи багатоскребкових траншейних екскаваторів	32
1.4. Аналіз досліджень щодо визначення критичної глибини різання ґрунтів і довжини лемеша ґрунторозробних органів	39
1.5. Аналіз режимів роботи та алгоритмів визначення параметрів ланцюгових траншейних екскаваторів	49
1.6. Мета та завдання дослідження.....	53
Висновки за розділом 1	54
РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ КРИТИЧНОГЛИБИННОГО БЛОКОВАНОГО РІЗАННЯ ҐРУНТІВ РІЗЦЯМИ ЛАНЦЮГОВО-СКРЕБКОВИХ ТРАНШЕЙНИХ ЕКСКАВАТОРІВ	55
2.1. Передумови теоретичного дослідження.....	55
2.2. Визначення критичної глибини різання ґрунту крайніми боковими різцями та їх ширини	56
2.3. Визначення довжини лемеша та сили різання ґрунту різцями (зубами) траншейних екскаваторів	67

2.4. Визначення числа ліній різання та висоти грунтотранспортувальних скребків.....	77
2.5. Обґрунтування критичноглибинних режимів роботи та визначення продуктивності багатоскребкових траншейних екскаваторів	85
2.6. Визначення зусиль і енергоємності блокованого критичноглибинного різання ґрунту різцями багатоскребкових траншеєкопачів	90
Висновки за розділом 2	96
3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ КРИТИЧНОГЛИБИННОГО БЛОКОВАНОГО РІЗАННЯ ҐРУНТІВ РІЗЦЯМИ ЛАНЦЮГОВО-СКРЕБКОВИХ ТРАНШЕЙНИХ ЕКСКАВАТОРІВ	99
3.1. Мета і завдання експериментальних досліджень	99
3.2. Схеми вимірювань та техніка проведення експериментальних досліджень блокованого різання ґрунту крайніми боковими різцями	99
3.3. Забудова стендів та техніка випробування роботи ножово- скребкових секцій екскаваторів	106
3.4. Схеми вимірювань, система запису та обробки експериментальних даних	113
3.4.1. Визначення критичної глибини асиметричного блокованого різання	113
3.4.2. Визначення довжини лемеша	115
3.4.3. Визначення сили різання випробувальним зубом та ножово-скребковою секцією робочого органа екскаватора	116
3.4.4. Визначення повторності дослідів	121
3.5. Результати експериментальних досліджень	118
3.5.1. Результати досліджень критичної глибини асиметричного блокованого різання крайніми боковими різцями	118

3.5.2. Результати досліджень довжини лемеша крайніх бокових різців	123
3.5.3. Результати досліджень критичноглибинного різання грунту ножово-скребковими секціями робочого обладнання	126
Висновки за розділом 3	128
4. ПРАКТИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ ДО ВПРОВАДЖЕННЯ КРИТИЧНОГЛИБИННОГО БЛОКОВАНОГО РІЗАННЯ ҐРУНТІВ РІЗЦЯМИ ЛАНЦЮГОВО-СКРЕБКОВИХ ТРАНШЕЙНИХ ЕКСКАВАТОРІВ	129
4.1. Створення методики розрахунку параметрів ланцюгово-скребкових траншейних екскаваторів на основі критичноглибинного різання ґрунтів.....	129
4.2. Економічне обґрунтування практичного впровадження ланцюгових траншейних екскаваторів безперервної дії з критичноглибинним різанням ґрунту	143
4.2.1 Вихідні дані для розрахунку трудових та грошових витрат	143
4.2.2. Визначення прямих витрат	144
4.2.3. Визначення накладних витрат	147
4.2.4. Визначення собівартості одиниці механізованих робіт	148
Висновки за розділом 4	150
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	152
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	156
Додаток А Результати розрахунку теоретичних залежностей.....	167
Додаток Б Конструкції експериментальних стендів для роботи секцій ножово-скребкового обладнання екскаваторів	175
Додаток В. Список публікацій здобувача за темою дисертації.....	180
Додаток Г. Акти впровадження	183

ВСТУП

Актуальність теми. Розвиток цивільного і промислового будівництва та ріст тенденції будівництва підземних комунікацій спричинили збільшення обсягу робіт з укладання газонафтопроводів, водоводів, каналізаційних систем, енергетичних кабелів і кабелів зв'язку. Значну частину земляних робіт під час будівництва означених комунікацій виконують траншейними екскаваторами.

Безперервність робочого процесу й використання робочого часу на екскавацію ґрунту забезпечують більш високу продуктивність безперервної дії цих машин порівняно з однокішчевими екскаваторами циклічної дії, в яких на екскавацію ґрунту витрачається не більше ніж $1/3$ робочого часу, в інших же $2/3$ часу витрачається на переміщення робочого обладнання і ґрунту.

В поданій дисертаційній роботі розглядається можливість підвищення ефективності ланцюгово-скребкових траншейних екскаваторів на основі критичноглибинного різання ґрунтів його різцями. Використання такого підходу передбачає оптимізацію процесу риття траншей, а саме зменшення енергоємності та підвищення продуктивності.

З огляду на вказане ми переконуємось, що розроблення методики та створення алгоритму визначення параметрів і режимів роботи ланцюгово-скребкових траншейних екскаваторів на основі критичноглибинного різання ґрунтів є важливим науковим та практичним завданням.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконувалася відповідно до наукового напрямку та завдання державної науково-технічної програми «Енергетична стратегія розвитку України на період до 2030 року» (Постанова Кабінету Міністрів України №145-р від 15 березня 2008 р.), зі ст. 3 Закону України «Про пріоритетні напрями розвитку науки і техніки» від 16.01.2016 р. за № 2623-14, а також відповідно до наукового напрямку кафедри будівельних і дорожніх машин Харківського національного автомобільно-дорожнього

університету (ХНАДУ), пріоритетними напрямками розвитку науки і техніки України на період до 2020 року, зазначеними в Законі України від 9 вересня 2010 р. №2519-IV про внесення змін до Закону України «Про пріоритетні напрямки розвитку науки і техніки» (Закон України «Про пріоритетні напрями розвитку науки і техніки» від 11 липня 2001 р. № 2623-III).

Мета і завдання досліджень. Метою роботи є підвищення ефективності багатоскребкових ланцюгових траншейних екскаваторів на основі критичноглибинного різання ґрунтів.

Основні завдання дослідження:

- визначити критичну глибину різання для крайніх бокових різців;
- визначити довжину лемеша крайніх бокових різців;
- визначити основні параметри робочого органа та режими роботи екскаватора, а саме: кут нахилу бокових розширень прорізу до горизонту, відстань між суміжними ґрунторозробними органами, число ліній різання і кількість різців, що знаходяться в забої, висоту скреbkів, швидкість різання та подачі, продуктивність, сумарну силу різання тощо;
- провести необхідні експериментальні дослідження;
- розробити алгоритм інженерних розрахунків та побудувати номограми для визначення основних параметрів та режимів роботи екскаваторів у залежності від геометричних параметрів різців, параметрів траншеї та ґрунтових умов;
- провести економічну оцінку ефективності запропонованих рекомендацій за результатами дисертаційних досліджень.

Об'єктом дослідження є процеси взаємодії різців та скреbkів робочого органа ланцюгового траншейного екскаватора.

Предмет досліджень – закономірності процесів взаємодії з ґрунтом різців робочого органа екскаваторів, що працюють у режимі критичноглибинного блокованого різання ґрунту.

Наукова новизна та положення, які виносяться на захист. Наукова новизна отриманих результатів полягає в розробленні узагальнених теоретичних залежностей, які вперше отримані для визначення основних параметрів робочого органа та режимів роботи ланцюгового траншейного екскаватора, в якого різці працюють в умовах критичноглибинного різання ґрунту. Зокрема вперше одержані такі результати:

- обґрунтовані передумови підвищення ефективності роботи ланцюгових траншейних екскаваторів за рахунок критичноглибинного різання ґрунту та визначено довжину лемеша крайніх бокових різців для цих умов;

- визначені основні параметри робочого органа та режими роботи екскаватора, а саме: відстань між суміжними ґрунторозробними органами, число ліній різання і кількість різців, що знаходяться в забої, висоту скребків, швидкість різання та подачі, продуктивність, сумарна сила різання та інші;

- розроблена методика проведення експериментальної перевірки теоретичних положень та створені натуральні зразки різців робочого органа та їх комбінації для випробування в ґрунтовому каналі та польових умовах;

- розроблено алгоритм інженерних розрахунків та побудовані номограми для визначення основних параметрів та режимів роботи екскаваторів у залежності від геометричних параметрів різців, параметрів траншеї та ґрунтових умов;

- розрахунками підтверджено економічну ефективність від модернізації ланцюгових траншейних екскаваторів з критичноглибинним різанням ґрунту різцями за рахунок зменшення енергетичних витрат на процес розробки ґрунту та підвищення продуктивності розриття траншеї і темпів виконання робіт із прокладання підземних інженерних комунікацій.

Практичне значення отриманих результатів роботи полягає в розробці методики та створенні алгоритму визначення параметрів і режимів роботи ланцюгово-скребкових траншейних екскаваторів на основі критично-глибинного різання ґрунтів. На основі отриманих інженерних розрахунків було складено технічне завдання на створення типоряду установок, які були

прийнятті ТОВ «НВП «Газтехніка ЛТД» для впровадження у виробництво шляхом модернізації ланцюгового траншейного екскаватора ЕТЛ-208. З метою практичного використання під час розроблення траншей для прокладання підземних комунікацій модернізована машина прийнята спеціалізованими будівельними компаніями ТОВ «Харківспецбуд-1» та ТОВ «Промтехніка Плюс».

Результати досліджень використовуються в навчальному процесі при викладанні спеціальних дисциплін «Машини для земляних робіт», «Динаміка БДМ», «Машини для підземного прокладання інженерних комунікацій» для студентів спеціальності 6.05.05.03 «Машинобудування» та 133 «Галузеве машинобудування».

Особистий внесок здобувача. Всі основні наукові положення, результати, висновки та рекомендації дисертаційної роботи здійснені автором одноосібно та опубліковані в роботах [1–11]. Робота [11] опублікована без співавторів. У друкованих працях, які опубліковані у співавторстві, автору належить визначення передумов створення критичноглибинних режимів роботи багатоскребкових ланцюгових траншейних екскаваторів [5], установлення закономірностей процесів роботи ланцюгових екскаваторів у режимі критичноглибиного різання ґрунту та розроблення розрахункових залежностей для визначення: робочої швидкості, швидкості подачі та швидкості різання ланцюгово-скребковими траншеєскопачами [2], довжини лемеша та сили різання ґрунту (зубами) траншейних екскаваторів [3], критичноглибинних сил різання ґрунтів, енергоємності ланцюгово-скребкових траншейних екскаваторів [4] і технічної продуктивності та інших технологічних параметрів машини [1, 11], розроблено методику розрахунку параметрів скребкового робочого органа траншейного екскаватора на основі критичноглибинного різання ґрунтів [6]. Результати теоретичних досліджень експериментально підтверджені здобувачем та обговорені на конференціях [8–11].

Апробація результатів дисертації. Окремі розділи й дисертація в цілому обговорювалися і отримали позитивну оцінку на науково-технічних, науково-практичних конференціях і семінарах, саме: Міжнародній науково-практичній конференції «Підвищення ефективності підйомно-транспортних, будівельних, дорожніх машин і комплексів» (м. Дніпро, Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, 2018); II Міжнародній українсько-азербайджанській конференції «Building Innovations – 2019», 23–24 травня 2019 р. (м. Полтава, ПолтНТУ); II Міжнародній науково-практичній конференції «Комп’ютерні технології і мехатроніка» (28 травня 2020 р., ХНАДУ); VI та VII Міжнародних науково-практичних конференціях «Трансфер інноваційних технологій» (20–21 травня 2020р. та 2021 р., м. Київ, КНУБА).

Публікації. Основні результати досліджень опубліковані в 12 друкованих працях, у тому числі 4 статті у фахових видань (з яких 1 входить до наукометричної бази даних SCOPUS та 1 – до міжнародних видань), 4 – у матеріалах і тезах збірників доповідей на всеукраїнських та міжнародних науково-технічних конференціях та 4 статті, які додатково відображають наукові результати дисертації.

Структура і обсяг роботи. Дисертація складається зі вступу, 4 розділів, висновків, списку використаних джерел із 117 найменувань (11 сторінок) та 4 додатків. Повний обсяг роботи складає 184 сторінки, в тому числі 154 сторінки основного тексту, 13 таблиць, 50 ілюстрацій.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ПЕРЕДУМОВ СТВОРЕННЯ КРИТИЧНОГЛИБИННИХ РЕЖИМІВ РОБОТИ БАГАТОСКРЕБКОВИХ ЛАНЦЮГОВИХ ТРАНШЕСКОПАЧІВ.

МЕТА ТА ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1. Огляд сучасних багатоскребкових ланцюгових траншейних екскаваторів

Траншейні багатоскребкові екскаватори на базі пневмоколісних тракторів випускають такі заводи: Дмитрівський екскаваторний завод, Омський завод транспортного машинобудування, Колійський машинобудівний завод [1], фірма «Таллекс» (Естонія) [2]. Технічні параметри таких машин відрізняються несуттєво, тому розглянемо їх на прикладі екскаватора ЕТС-1607 – 1 фірми «Таллекс» [2.3]. Цей екскаватор є наступною модифікацією моделей екскаваторів ЕТЦ-165 і ЕТЦ-165А, які раніше випускала фірма «Таллекс». Особливістю конструкції є встановлення на ньому додаткового змінного робочого обладнання для розроблювання траншей у мерзлих, вічномерзлих та міцних ґрунтах, що дає змогу використовувати машину за будь-якої пори року. Завдяки гідромеханічному приводу можливе безступінчасте регулювання швидкості робочого переміщення. Базова машина – колісний трактор МТЗ-82/МТЗ-920. Ширину розроблюваної траншеї змінюють дискретно 0,2, 0,27 і 0,4 м, встановлюючи на екскаватор серпоподібні або скребкові ланцюги відповідної ширини. Швидкість ланцюга змінюється від 0,83 до 2,14 м/с. Максимальна глибина траншеї – 1,6 м.

Баровим робочим органом нарізають щілини шириною 0,14 м та глибиною до 1,3 м у мерзлих і міцних ґрунтах, а також в асфальтобетоні. Ланцюг має змінні армовані різці.

Робочий орган з ланцюгом «алігаторного» типу є найбільш потужним додатковим обладнанням екскаватора під час розроблення траншей шириною

0,25 м та глибиною 1,1, 1,3 та 1,6 м у мерзлих, вічномерзлих і міцних ґрунтах, тому що оснащений швидкозмінними надміцними різцями.

Траншейний ланцюговий екскаватор ЕТЦ-250 ВАТ «ІРМАШ» (Росія) призначений для розроблення траншей шириною 0,25 м та глибиною до 2,5 м під газопроводи, водопроводи та електрокабелі в ґрунтах I–IV категорій і в мерзлих ґрунтах сезонного промерзання [2, 4]. Екскаватор має два гусеничні рушії з регульованим гідрооб'ємним приводом. Робоча швидкість переміщення до 0,4 м/с, а швидкість ланцюга до 3,6 м/с. За відгуками спеціалістів [2, 5], експлуатаційні витрати на ЕТЦ-250 більш ніж в 1,5 рази менші порівняно з імпорнтними аналогами.

Фірма Case Corporation (США) [2, 6] має модельний ряд із шести ланцюгових траншейних машин на колісній базі від ручної моделі 60 масою 327 кг до моделі 960 масою 5760 кг, максимальна глибина траншеї відповідно від 0,914 до 2,13 м.

Корпорація Astec Industries, Inc. (США), об'єднавшись із компанією GASE та створивши в 2002 році компанію Astec Underground [2, 7], випускає модельний ряд комунальних траншейних машин GASE потужністю двигуна від 9, 7 до 138 кВт під маркою Astec. Крім шести машин GASE, компанія розширила та модернізувала модельний ряд пневмоколісних і гусеничних багатоскребкових екскаваторів з гідростатичним приводом [2, 8]. Максимальна глибина копання від 0,61 до 2,4 м, а ширина траншеї від 0,1 до 0,61 м.

Одна з найбільш світових лідерів у галузі траншейних скребкових екскаваторів є італійська компанія Tesmes, яка випускає машини масою від 18 до 155 т та потужністю двигуна від 158 до 551 кВт [2, 9] для виконання таких робіт:

- 1) прокладання оптико-волоконних кабелів;
- 2) розроблювання вузьких траншей для водо- та газопостачання;
- 3) прокладання каналізаційних мереж із трубами великих діаметрів;

4) виконання дренажних робіт у сільському господарстві та будівництві;

5) розроблювання траншей для магістральних газо - та нафтопроводів.

Максимальна глибина траншеї від 1,85 до 7,4 м. Ширина траншеї від 0,2 до 1,52 м. На робочих органах машин Tesmec використовують запатентовані схеми розташування різців залежно від фізико-механічних характеристик розроблюваної породи, які збільшують продуктивність і зменшують витрати зубів.

На робочому органі встановлені різці з твердосплавними вставками. Найбільший траншейний екскаватор Tesmec TRS1675 має робочий орган, що являє собою закріплені на ланцюгу пластини з розташованими на них у відповідному порядку різцями. Його відмінністю є різна ширина пластин, до яких закріплені різці. Така конструкція робочого ланцюга зменшує сили тертя з боковими стінками траншеї.

Американська компанія The Charles Machine Works випускає машини під торговою маркою Ditch Witch [2, 10]. Модельний ряд машин включає чотири малогабаритні моделі (1030, 1230, 1330, 1820), дев'ять моделей на базі колісних тракторів серії RT та дві моделі на гусеничному ході (НТ 115, НТ 185). Машини випускають за модульним принципом.

Колісні трактори потужністю від 30 до 135 кВт мають електронну систему контролю, що відслідковує навантаження на двигун і автоматично встановлює та підтримує максимальну продуктивність відповідно до конкретних ґрунтових умов.

Ланцюгові траншейні екскаватори Trencor (США) [2, 11] випускають 13 моделей на гусеничному шасі з гідростатичним двошвидкісним і механічним приводом, що забезпечує діапазони робочого та транспортного переміщень.

Моделі мають, як правило, механічний привід робочого органа, що забезпечує декілька робочих швидкостей ланцюга. Потужність двигунів екскаваторів від 138 до 1118 кВт. Максимальна глибина копання від 1,8 до 10,7 м. Ширина траншей – від 0,25 до 2,44 м.

Фірма акцентує увагу на наступних перевагах механічного привода порівняно з гідромеханічним:

- 1) більш ніж 90% потужності двигуна передається безпосередньо на ланцюговий робочий орган;
- 2) збільшується продуктивність, оскільки робочий орган створює великий крутний момент і руйнує ґрунт товстими стружками;
- 3) велика кількість передач механічного привода дає змогу оператору вибрати оптимальну швидкість ланцюга відповідно до реальних ґрунтових умов;
- 4) простота конструкції механічного привода.

Фірма Trencor випускає машини поздовжнього копання ROADMINER для копання широких (до 5,0 м) траншей глибиною до 1,5 м у міцних ґрунтах і скельних породах [2]. Робочий орган складається з двох крайніх фрез і ланцюгового робочого органа, ланками якого є гусеничні траки з різцями. Розроблений фрезами ґрунт переміщається до середини траншеї та транспортується із забою ланцюговим робочим органом. Привід робочого органа – механічний.

Фірмою Vermeer (США) створені землерийно-фрезерні машини на базі траншейних скребкових ланцюгових екскаваторів T1055 і T1255 з потужністю двигуна відповідно 317 і 447,4 кВт для копання траншей глибиною 0,61 і 69 м та шириною відповідно 3,4 і 3,66 м в міцних і скельних ґрунтах.

Екскаватор-дреноукладальник ДУ-4003 ВАТ «ІРМАШ» (Росія) [2] призначений для прокладання закритого горизонтального пластмасового дренажу на глибину до 4,0 м. Ширина траншеї – до 0,4 м. Швидкість робочого ланцюга: 0,735; 1,108; 1,537; 2,168; 2,569; 3,868; 5,376; 7,573 м/с. Конструктивні особливості робочого органа дають змогу укласти дренаж без винесення зруйнованого ґрунту на денну поверхню.

Голландські фірми Mastenbroek та Hollandrain [2] випускають ланцюгово-скребкові дренажні машини з потужністю двигуна від 97 до 448 кВт, що копають траншеї максимальною глибиною від 1,4 до 4,0 м і

шириною від 0,12 до 1,1 м. Деякі машини мають вертикально встановлений ланцюговий робочий орган, глибина копання яких до 10 м. Наприклад, машина BSV фірми Hollandrain має глибину копання 8,0 м, а ширину траншеї – 0,24 м. Швидкість різання ланцюга до 4,7 м/с, а швидкість робочого ходу до 0,14 м/с.

Науково-дослідницький і технічний центр «Ротор» (Україна, м. Київ) сумісно з Державним підприємством «Завод імені В.О. Малишева» (Україна, м. Харків) виготовили комплекс машин для капітального ремонту газо- та нафтопроводів без піднімання труби на денну поверхню [2]. В комплекс входить машина для пошарового зняття ґрунту МПРГ-1М, машина для розкриття трубопроводів MBT-M, машина підкопувальна роторна МПР-1М, машина для підбивання ґрунту під трубопровід МП-М.

Ґрунторозробний орган машини МПРГ-1М ланцюговий складається з двох секцій. Кожна секція має раму з трьома робочими ланцюгами. До ланцюгів закріплені балки з різцями, що оснащені твердосплавними пластинами. Для утворення вертикальних стінок траншеї на осі натяжних зірочок встановлені фрези. Технічна продуктивність у немерзлих ґрунтах, якщо глибина копання 0,8 м, складає до 0,05 м/с.

Машина для розкриття трубопроводів MBT-M призначена для розкриття трубопроводів діаметром від 530 до 1220 мм у ґрунтах I–IV категорій. Ланцюговий робочий орган складається також із двох секцій, кожна з яких має раму, на якій встановлені ведучий і натяжний вали з зірочками, що зв'язані трьома ланцюгами.

На ланцюгах встановлені виносні балки та ґрунторозробні балки з основними та боковими різцями. Технічна продуктивність або робоча швидкість складає до 0,03 м/с.

1.2. Аналіз схем розставляння та форми ґрунторозробних і транспортувальних елементів на ланцюгово-скребкових робочих органах траншейних екскаваторів

Робочий орган багатоскребкового траншейного екскаватора являє собою систему тягових ланцюгів і скребків (балок), на яких у певному порядку розташовані та закріплені різці з відомими геометричними параметрами. Скребками-різцями здійснюється відділення стружки від масиву ґрунту в умовах напівблокованого, блокованого та вільного різання ґрунту. Різання ґрунту різцями (зубами) та скребками (балками) є найбільш значущою складовою процесу копання ґрунту ланцюгово-скребковим робочим органом.

Аналіз і узагальнення різних джерел інформації щодо конструкцій вітчизняних і закордонних багатоковшових екскаваторів [1–31] дозволили розробити класифікаційну блок-схему розставляння ґрунторозробних і транспортувальних елементів на ланцюгових багатоскребкових екскаваторах (рис. 1.1.)

Установлено [2], що від розставляння різців, їх форми, кількості залежать продуктивність робочого процесу екскаватора, енергоємність, динамічні навантаження на ланцюги. Багатоскребкові ланцюгові траншейні екскаватори розробляють і транспортують ґрунт такими способами (див. рис. 1.1):

- 1) роздільним – різці попередньо руйнують ґрунт по ширині траншеї, а наступні скребки транспортують зруйнований ґрунт на денну поверхню;
- 2) сумісним – скребки-різці одночасно руйнують і транспортують ґрунт до місця вивантаження;
- 3) комбінованим – здійснюється як за роздільним способом з тією різницею, що різці не тільки руйнують ґрунт але і частково його транспортують.

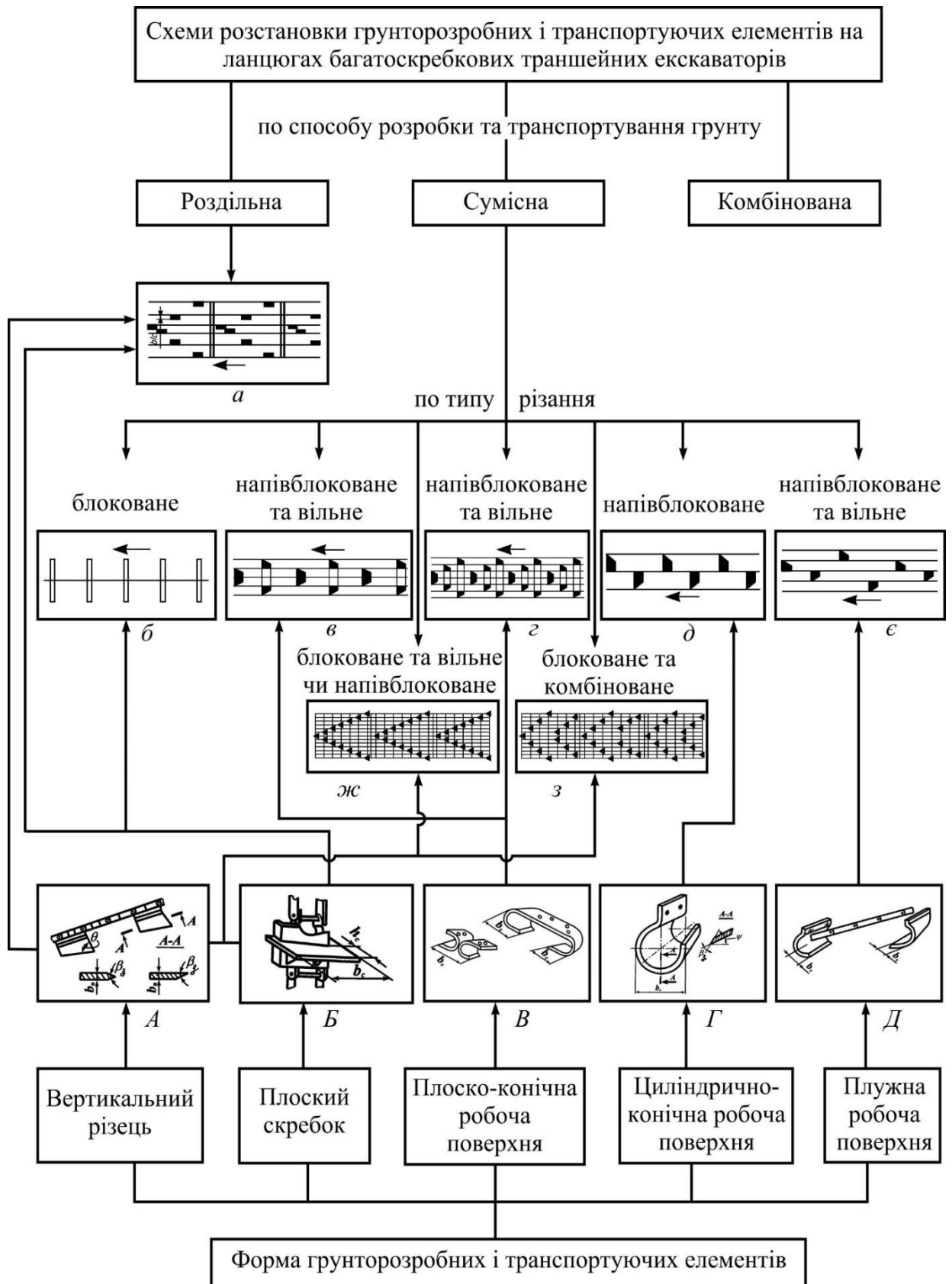


Рисунок 1.1 – Класифікаційна блок-схема розставлення грунторозробних і транспортувальних елементів на ланцюгах багатоскребкових траншейних екскаваторів

За висновками багатьох учених сумісна схема розроблення та транспортування ґрунтів плоскими скребками-різцями є найбільш універсальною та оптимальною [2, 32–34]. Сумісну схему застосовують не тільки для розробки однорідних ґрунтів нормальної вологості, а й ґрунтів підвищеної вологості та липкості.

Для забезпечення такої схеми розробки необхідно, щоб різці одного ряду проходили в проміжках між різцями другого ряду, а це означає, що група різців повинна бути розміщена щонайменше на двох балках (скребках) [34].

Форма та розміри різців також суттєво впливають на техніко-економічні показники багатоскребкових ланцюгових екскаваторів [35]. У різцях конструкції, що показана на рис. 1.1, В, не виключена можливість забивання ґрунтом або іншими твердими включеннями простору між паралельними поверхнями. В цьому випадку процес руйнування ґрунту буде здійснюватися ґрунтовим ядром ущільнення, що утворилося на лобовій поверхні різця і, як наслідок, призведе до збільшення лобового опору та енергоємності робочого процесу.

Для роботи на важких ґрунтах з високою вологістю без твердих включень добре зарекомендували себе скребки-різці з круглою різальною кромкою. Форма скребка являє собою зрізаний конус, менша основа якого зміщена таким чином, що верхня твірна лінія перпендикулярна більшій основі конуса (див. рис. 1.1, Г).

Для ефективної роботи екскаватора в його конструкції передбачено очисний пристрій – ніж, що закріплений на рамі робочого органа. Скребки очищаються при переході через ведучу зірочку.

Аналіз конструкцій різців еліптичної або С-подібної форми (див. рис. 1.1, Д) показав [35], що еліптичні різці мають недоліки. Основним недоліком є відсутність чіткої межі переходу від вертикального до горизонтального різання, що знижує енергоємність його різання. Другий

недолік – це залипання ґрунту у скребку, що збільшує опір різанню та знижує продуктивність машини за виносною здатністю.

Таким чином, найбільш універсальними й ефективними для руйнування ґрунту є різці, що показані на рис. 1.1, А, а для транспортування ґрунту – плоскі скребки (див. рис. 1.1, Б). Суміщення їх в один вузол скребок-різець, у якому основою для закріплення різців є плоский скребок (балка), є логічним, оскільки, такі різці мають мінімальну площу контакту з ґрунтом у процесі його руйнування.

Для різців (див. рис. 1.1, Б, Г) ширина різця дорівнює ширині траншеї, а для різців (див. рис. 1.1, Д) їх ширина дорівнює половині ширині траншеї. Для різців, що показані на рис. 1.1, А, В, ширину траншеї розбивають на кілька ліній різання так, щоб опір різанню кожним різцем був приблизно однаковим, тобто ширина різальної частини кожного різця була б приблизно рівною. При ширині траншеї 200 мм кількість ліній різання дорівнює 3, а при ширині 200–400 мм – 5. Різці, що зображені на рис. 1.1, А, необхідно розміщувати по ширині траншеї на відстані один від одного 2–2,5 товщини стружки, яка залежить від ширини різця [26].

Критерії раціональності розміщення різців [2] – енергоємність різання, для мінімуму якої необхідно забезпечити роботу крупним сколом, мінімальна динамічність навантажень на робочий орган, універсальність схеми, максимальна продуктивність або швидкість робочого руху машини при виборі схем розміщення різців не враховуються.

Із наведеного вище можна зробити висновок, що вибір схеми розміщення різців, їх кількість залежать, як правило, від ширини траншеї і форми різців, а не від ґрунтових умов і критеріїв раціональностей розміщення різців [2]. Це основний недолік наявної методики вибору параметрів багатоскребкових ланцюгових траншейних екскаваторів.

1.3. Аналіз досліджень і теоретичних передумов для створення критичноглибинних режимів роботи багатоскребкових траншейних екскаваторів

Проблема створення високопродуктивних машин вирішується в першу чергу теоретичними дослідженнями процесу взаємодії робочих органів з ґрунтом.

Дослідженням та створенням конструкцій скребкових екскаваторів безперервної дії поздовжнього копання, їх робочих органів опікувалися багато вчених і конструкторів. Це, насамперед, М. Г. Домбровський [1], В. Д. Мусійко [2, 34], Ю. О. Ветров [36], Л. А. Хмара [37], В. А. Румянцев [38], А. А. Вайнсон [39], В. К. Ільгісоніс [40, 41], О. В. Биков [32], Г. Л. Ципурський [42], В. Л. Баладінський [43], М. К. Сукач [44], І. І. Родін [45], Г. В. Гумбург [46], Е. А. Джангулян [47, 48], В. Г. Зедгенизов [49], В. І. Ковальова [50], М. П. Кузьминець [51], А. Н. Стрельников [52], В. В. Суріков [53], Б. Н. Токарев [54], Н. Б. Мартинова [55], В. А. Слєпченко [56], Р. Ю. Сухарев [57], А. Н. Школьний [58], А. Б. Лєтопольський [59]. Ними розроблені основні положення методик розрахунку основних параметрів, продуктивності, силового навантаження землерийних машин.

В. Д. Мусійко [34] з метою зниження енергоємності різання і підвищення продуктивності машин запропонував ідею критичноглибинного руйнування ґрунтів багатоскребковими ланцюговими траншейними екскаваторами. На цьому ґрунті визначив основні параметри ланцюгового скребково-різцевого робочого органа траншеєкопача, зокрема: відстань між різцями, кількість ліній різання, крок встановлення одиночних і груп різців, співвідношення між швидкостями тягових ланцюгів і швидкістю руху машини (швидкість подачі) та інші. Сили блокованого та напівблокованого різання визначені за допомогою емпіричних залежностей А. М. Зелєніна [60]. Основним недоліком реалізації ідеї є те, що при визначенні основних параметрів робочого органа та режимів його роботи не враховані фізико-механічні

властивості ґрунтового середовища, а також не встановлені абсолютні значення швидкостей для критичноглибинного різання.

Г. В. Гумбург [46] і Н. Б. Мартинова [55] досліджували різці (скребки) різної форми. У результаті проведених лабораторних експериментів було встановлено, що еліптичний різець має найнижчий коефіцієнт транспортувальної здатності ($K_T = 0,1-0,4$), що призводить до зниження продуктивності із збільшенням глибини траншеї та підвищення енергоємності процесу розробки траншеї. Для визначення дотичної складової сили опору різанню ґрунту запропонована залежність

$$P = P_p + G_{\text{стр}} [\cos(180^\circ - \alpha) \mu \pm \sin(180^\circ - \alpha)] K_T^\alpha K_\phi, \quad (1.1)$$

де P_p – дотична складова сили опору різанню ґрунту;

$G_{\text{стр}}$ – сила тяжіння стружки ґрунту, що зрізається різцем;

α – кут нахилу забою з напрямком переміщення дреноукладача;

μ – коефіцієнт внутрішнього тертя ґрунту;

K_T^α – коефіцієнт транспортувальної здатності різця на нахилений до горизонту траєкторії руху;

K_ϕ – коефіцієнт форми різця.

Е. А. Джангулян [47, 48] для подолання сил у ланцюгу скребкового робочого органа пропонує таку залежність:

$$P = P_1 + P_2 + P_3 + P_4, \quad (1.2)$$

де P_1 – сила попереднього натягування ланцюга;

P_2 – динамічна складова при огинанні ланцюгом приводної зірочки;

P_3 – сила, що витрачається на подолання сили опору різанню;

P_4 – сила, що необхідна для підйому ґрунту до місця вивантаження.

Сила опору копанню в розгорнутому вигляді переписеться таким чином:

$$P = P_1 + \frac{n_1^2 l \Sigma G}{60g} + P_{01} \frac{H}{T_0 \sin \alpha} [1 + \mu(n-1)] + \frac{\Pi \rho}{3600V} \left(\frac{H + 2H_0}{2} \right), \quad (1.3)$$

де n_1 – число обертів ведучого вала, об/хв;

l – крок ланцюга, м;

ΣG – сила тяжіння частин робочого органа, що рухаються, Н;

P_{01} – сила різання, Н;

H – глибина траншеї, м;

T_0 – крок установалення різців, м;

α – кут нахилу робочого органа до горизонту, град;

μ – коефіцієнт, що враховує розставлення різців;

n – число різців в одній групі;

Π – продуктивність, м³/год;

ρ – щільність ґрунту, кг/м³;

V – швидкість ланцюга, м/с;

H_0 – висота розвантаження, м.

Сила різання ґрунту визначається відповідно за залежністю [47]

$$P_{01} = \eta(R - R_0) R A_0 \left[\frac{\gamma(R - R_0)}{2} + P'_0 + \left(1 - \frac{1}{A} \right) K_{\text{сц}} \rho \right] \times \\ \times \left[\arcsin \left(\arcsin \frac{\sqrt{R^2 - (\delta - R)^2} - R}{R} \right) + \frac{\pi}{2} \right], \quad (1.4)$$

де R – радіус кривизни різальної кромки;

A_0 – коефіцієнт, що враховує просторовість процесу різання;

R_0 – радіус кривизни задньої грані;

γ – щільність ґрунту;

A – коефіцієнт, що залежить від кута внутрішнього тертя та кута різання;

P_0' – тиск розташованих вище шарів ґрунту;

$K_{\text{сц}}$ – питоме зчеплення ґрунту;

ρ – кут внутрішнього тертя ґрунту;

δ – товщина стружки, що зрізається.

У поданій розрахунковій залежності враховується форма різальної кромки, просторовість процесу та фізико-механічні властивості ґрунтів.

Недоліками залежностей (1,2–1,4) є нивявність у них невідомих коефіцієнтів, а також те, що не враховується опір переміщенню зруйнованого ґрунту (сили тертя зруйнованого ґрунту по забою).

У роботах В.Г. Зедгенизова [49], А.Н. Стрельнікова [52], Р.Ю. Сухарєва [57] та А.Н. Школьного [58] взаємодію скребкового робочого органа з ґрунтом репрезентовано у вигляді математичної моделі. Системи рівнянь ураховують міцнісні характеристики ґрунту, геометричні параметри робочого органа та кут його установки.

Силова взаємодія робочого процесу описується системою рівнянь, що враховують основні положення теорії різання ґрунтів. Математична модель дозволяє отримати значення сили опору копанню та його складових від вхідних параметрів моделі. Визначені раціональні режими роботи ланцюгових багатоскребкових траншейних екскаваторів залежно від ґрунтових умов.

Подальшим вивченням скребкових робочих органів займався В.І. Ковальов [50]. Він відслідковував факт нерівномірності навантаження різальних кромки різців за їхнім периметром, довів, що при різанні ґрунту утворюються складні форми перерізу стружок, що складаються із комбінації 2–3 елементарних форм – блокованої, напівблокованої та вільної.

Автором отримані вирази для визначення питомої сили опору різанню ґрунту різцем:

для блокованої схеми

$$K_6 = \frac{c\tau_T \left(\varphi \delta^{0,51} + 0,9 \delta^{1,57} \operatorname{ctg} \rho \right) K_\alpha K_{\text{ав}}}{\delta (\varphi + \delta \operatorname{ctg} \rho)}, \quad (1.5)$$

для напівблокованої схеми:

$$K_{\text{нб}} = \frac{0,71c\tau_T \left[\delta^{0,51} (\epsilon - \delta(1 + 0,5\text{ctg}\rho)) + 2\delta^{1,57} \right] K_{\alpha} K_{\text{ав}}}{\delta(\epsilon - 0,5\delta)\text{ctg}\rho}, \quad (1.6)$$

для вільної схеми:

$$K_{\epsilon} = \frac{0,53c\tau_T \delta^{0,51} K_{\alpha} K_{\text{ав}}}{\delta}, \quad (1.7)$$

де c – коефіцієнт, що враховує вплив радіуса кромки затуплення різця, мм;

τ_T – граничний питомий опір ґрунту, що відповідає границі його текучості при зсуві, Н/мм²;

ϵ – ширина різця, мм;

δ – товщина стружки, мм;

ρ – кут внутрішнього тертя ґрунту, град;

K_{α} – коефіцієнт, що враховує вплив кута різання на зміну сили різання;

$K_{\text{ав}}$ – коефіцієнт, що враховує динаміку зміни впливу кута різання при зміні ширини різця.

Недоліком залежностей (1,5)–(1,7) є наявність у них багато експериментальних коефіцієнтів, що залежать від багатьох факторів.

М. П. Кузьминець [51] дослідив вплив навантаження на магістральні трубопроводи ходового та робочого обладнання багатоскребкових спеціальних землерийних машин безперервної дії.

В.І. Миронов розглядав питання удосконалення скребкових робочих органів для роботи в умовах перезволожених налипаючих ґрунтів. Одним із завдань у роботі було отримання ефективної форми скребка та вибір геометричних параметрів скребкового робочого органа. В результаті теоретичних досліджень вирішено, що для розробки липких пластичних ґрунтів необхідно використовувати різальні елементи з рифленою поверхнею

різця. Таке технічне рішення дозволило знизити сили опору різанню за рахунок зменшення площі контакту різця з ґрунтом.

В.В. Суріков [53] провів теоретичні та експериментальні дослідження зі взаємодії скребкових робочих органів з ґрунтом і для визначення горизонтальної складової сили опору різанню ґрунту горизонтальними ножами, що працюють на принципі простого клина, отримавши формулу

$$R_T = CS(\epsilon K_\epsilon + m K_s)(1 + 0,256 \lg V) K_\delta, \quad (1.8)$$

де C – показник щільності ґрунту, що характеризується числом ударів ударника ДорНДІ;

S – товщина стружки, що зрізається, см;

ϵ – ширина стружки, см;

K_ϵ – питомий коефіцієнт важкості розробки ґрунту, Н/см²;

m – кількість закритих бокових зрізів;

K_s – питомий коефіцієнт зрізу ґрунту боковими гранями ножа, Н/см;

V – швидкість різання, м/с;

K_δ – коефіцієнт, що враховує вплив кута різання.

Б.Н. Токарев [54] з метою підвищення ефективності універсальних землерийних машин для розробки траншеї шириною 0,5 м запропонував застосувати ланцюгово-скребковий робочий орган роздільного типу. Він дослідив вплив кінематичних і конструктивних параметрів ланцюгово-скребкового робочого органа поздовжньо-поперечного копання на його транспортувальну здатність. Сила пасивного відпору ґрунту визначається за формулою

$$p_p = h_c^{1,35} (1 + 0,1 \epsilon_c) \left(1 - \frac{90^\circ - \beta_{ck}}{180^\circ} \right) \frac{\sin \left(45^\circ + \varphi_0 - \alpha - \frac{\rho}{2} \right)}{\sin \left(45^\circ - \varphi_0 + \alpha - \frac{\rho}{2} \right)}; \quad (1.9)$$

де h_c , ϵ_c – висота та ширина скребка, м;

$\beta_{\text{ск}}$ – кут нахилу скребка до траєкторії руху, град;

α – кут нахилу робочого органа до горизонту, град;

φ – кут природного ухилу ґрунту, град.

Дослідженнями встановлено, що ґрунт (пісок і суглинок) перед плоским скребком рухається як тіло, щільність якого з наближенням до денної поверхні збільшується. При цьому на формування призми ґрунту меншою мірою впливає її об'єм і ширина скребка (при $v_c \geq 0,2$ м), а більшою – кут установки робочого органа – $40\text{--}43^\circ$.

У роботі показано, що за рахунок установлення залежності між параметрами скребка (висота, ширина), забою та ґрунту можна збільшити продуктивність машини.

В.А. Слепченко [56], А.Н. Школьный [58] акцентують увагу на тому, що різці ланцюгового робочого органа при взаємодії з ґрунтовим середовищем знаходяться в різних умовах блокованості та мають різні навантаження, що залежить від кількості ліній різання та технологічних параметрів (швидкості різання та подачі). У результаті проведених досліджень проаналізовано наявні схеми розставлення різців і виявлено найбільш раціональні, що забезпечують більшу продуктивність траншеєкопача при однаковій потужності двигуна базової машини.

А.Б. Летопольский [59] на основі теорії граничної рівноваги ґрунтового середовища дослідив скребок з виступною середньою різальною кромкою. В результаті отримав залежність для визначення сили опору різанню скребками, яка враховує утворення напружених зон ґрунту перед скребком, кут різання, форму різальної кромки, масу зрізаного ґрунту на скребку в процесі руху забоєм.

Науковцем обґрунтовані раціональні значення кута різання ($\alpha = 25\text{--}30$), ширина середньої виступної частини скребка ($v_c = 0,02\text{--}0,04$ м), отримані рівняння регресії зміни сили опору копанню ґрунту скребком від зміни кута різання, товщини стружки та схеми різання ґрунту. Порівняно з блокованим різанням схема вільного різання дозволяє знизити опір скребка в три рази, а

порівняно з напівблокованим різанням, у два. Робота скребка за вільною схемою різання знижує силу опору копанню ґрунту по відношенню до напівблокованого різання на 40 %. Показано зниження питомої енергоємності робочого процесу зі збільшенням товщини стружки, що зрізається. Розроблена методика визначення кута різання та ширини скреbkів у залежності від фізико-механічних властивостей ґрунту, параметрів траншеї та потужності базової машини.

В роботі [59] не визначені необхідна товщина стружки та раціональні режими роботи (швидкості ланцюга та подачі), що забезпечують мінімальну енергоємність і максимальну продуктивність екскаватора, не обґрунтована схема розставлення різців на тягових ланцюгах.

У результаті аналізу всіх наведених вище досліджень, крім [34], встановлено, що відомі аналітично-експериментальні моделі взаємодії багатоскребкових ланцюгових траншейних екскаваторів з ґрунтом не визначають параметри і режими їх роботи на основі критичноглибинного різання ґрунтів, а тому не забезпечують мінімальну енергоємність і максимальну продуктивність робочого процесу.

Автором роботи [34] ідея критичноглибинного різання не реалізована для конкретних типів ґрунтів через їх фізико-механічні властивості. Для цього необхідні відповідні математичні моделі критичної глибини різання ґрунтів і довжини лемеша.

1.4. Аналіз досліджень щодо визначення критичної глибини різання ґрунтів і довжини лемеша ґрунторозробних органів

Критична глибина різання $h_{кр}$, згідно з дослідженнями Ю.О. Вєтрова [36], обумовлює мінімальну енергоємність його руйнування та оптимальну товщину стружки, а також виліт різця.

Вперше емпіричну залежність визначення критичної глибини різання в піску запропоновано Е. Дінглінгером [61]

$$h_{\text{кр}} = 74\sqrt{e}, \quad (1.10)$$

де e – ширина ножа в мм.

Аналогічна залежність запропонована для талих зв'язних ґрунтів [62–64]

$$h_{\text{кр}} = (70 - 100)\sqrt{e}. \quad (1.11)$$

Науковці Ю. С. Ветров [36], А. М. Зеленін [60], В. І. Уродов [65] і А. Е. Циммерман [66] зазначають, що числові значення критичної глибини різання, які отримують за формулами (1.10) і (1.11), є завищені. Тому для таких піщано-глинистих ґрунтів, які розробляються ножами з кутами різання $35\text{--}45^\circ$, Ю. О. Ветровим запропонована інша емпірична залежність [36, 67]

$$h_{\text{кр}} = (2,5 \dots 4,0)e. \quad (1.12)$$

Однак приведена залежність (1.12) не враховує вплив кута різання ножа на величину критичної глибини різання, що в подальшому враховано у формулі В. К. Руднева [68]

$$h_{\text{кр}} = a \left(\sin \alpha_p + \frac{\cos \alpha_p}{\mu} \right) e^n, \quad (1.13)$$

де α_p – кут різання ножа;

μ – коефіцієнт Пуассона;

a, n – апроксимуючі коефіцієнти.

Наведені вище залежності (1.10)–(1.13) не характеризують якісного взаємозв'язку між критичною глибиною різання, геометричними параметрами ножа і фізико-механічними властивостями талих ґрунтів. Вони носять частковий характер, вимагають у кожному конкретному випадку визначення експериментальних коефіцієнтів і, таким чином, не придатні для оптимізації ЗРО і їх робочих процесів у загальному вигляді.

Перша спроба отримання аналітичної залежності критичної глибини різання від основних параметрів ножа і фізико-механічних властивостей талих ґрунтів зроблена В. І. Уродовим [65]. На основі припущення рівності робіт на межі розділення двох зон зі сколювання й стискання деякого об'єму ґрунту отриманий вираз для визначення критичної глибини

$$h_{\text{кр}} = \frac{0,8E \sin \alpha_p \cos \varphi}{k \gamma \epsilon^2 \sin(\alpha_p + \varphi)} \left(\frac{1}{\cos \frac{\alpha}{2}} + \frac{af}{\sin \frac{a}{2}} \right) \left(\mu^2 e^{\frac{\epsilon}{2\mu}} - \frac{\mu}{2} \epsilon \right), \quad (1.14)$$

де E – модуль загальної деформації ґрунту;

α_p, α – відповідно кути різання і загострення ножа;

φ – кут внутрішнього тертя ґрунту;

k – коефіцієнт, який враховує защемлений стан ґрунту;

γ – питома сила тяжіння ґрунту;

ϵ – товщина (ширина) ножа;

a – емпіричний коефіцієнт;

f – коефіцієнт тертя ґрунту по сталі;

μ – коефіцієнт, який враховує вплив товщини робочого органа на деформацію стиснення.

Суттєвим недоліком формули (1.14) є необхідність штучного введення в неї коефіцієнтів α і k , величина яких необґрунтована. В протилежному випадку для $\mu = 5$ см, $\epsilon = 10$ см, $\alpha_p = 90^\circ$, $\alpha = 1$, $k = 1$ залежність (1.14) не дає вірогідних результатів ($h_{\text{кр}} \approx 100$ м – дані для суглинку).

У праці А. Б. Єрмілова і А. Н. Шаламова [69] отримана математична модель критичної глибини різання на основі використання теоретичних положень статички сипучого середовища і теорії пластичності. При цьому зроблено припущення, що енергоємності руйнування елементарного об'єму ґрунту на межі розділення двох зон рівні.

Для звичайних кутів різання ножа ($25^\circ \leq \alpha \leq 45^\circ$)

$$h_{\text{кр}} = \left[\frac{(\pi + 2) \left(\pi + 3 - \operatorname{ctg} \frac{\beta}{2} \right) \operatorname{tg} \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\rho}{2} \right) \cos \delta \sin \alpha}{2A_1 M \sin \varepsilon \operatorname{ctg} \rho} + \frac{\operatorname{ctg} \frac{\beta}{2} \sin \alpha}{4M} \right] l, \quad (1.15)$$

де A_1 , M , Q – функції: $A_1 = f_1(\rho, \delta, \alpha)$; $M = f_2(Q, \rho, \delta)$; $Q = f_3(\rho, \delta, \alpha)$;

α , β – відповідно кути різання і загострення ножа;

ρ , δ – відповідно кути внутрішнього і зовнішнього тертя ґрунту;

ε – кут, який утворюється між передньою і нижньою кромками бічної різальної грані клиновидного ножа;

l – ширина ножа.

В частковому випадку для плоского ножа ($\beta = \pi$)

$$h_{\text{кр}} = \frac{(\pi + 2)(\pi + 3) \operatorname{tg} \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\rho}{2} \right) \cos \delta \sin \alpha}{2A_1 M \operatorname{ctg} \rho} l. \quad (1.16)$$

Числовий аналіз математичних моделей (1.15) і (1.16) показав, що вони дають завищені результати критичної глибини різання ґрунтів, порівняно з експериментальними даними Ю. О. Вєтрова [36], А. М. Зеленіна [60], В. І. Уродова [65].

Така розбіжність даних пояснюється нехтуванням впливу на зусилля глибокого різання ґрунту в зоні його сколювання крайового ефекту. Згідно з результатами досліджень В. І. Баловнєва [70], А. М. Холодова [71],

Ю. О. Ветрова [36] та інших [60, 72], таке нехтування припустиме із відношеннями глибини до ширини різання $h/v \leq 0,3$. Зі збільшенням цього відношення, яке для процесу глибокого різання ґрунтів складає $h_{кр}/v > 2$ [36], зростає вплив крайового ефекту на зусилля і критичну глибину різання. Сумнівним є також висновок про незалежність критичної глибини від сил зчеплення ґрунту.

Аналітична модель для визначення критичної глибини з урахуванням крайового ефекту в процесі різання ґрунту ножом з гострою лобовою гранню розроблена Л. Б. Кравець [73].

Аналіз моделі показав, що зі збільшенням кута загострення ножа критична глибина різання зростає за екстремальним законом і досягає максимального значення для ножа з плоскою лобовою гранню. Це означає, що за інших рівних умов такий ніж має мінімальну силу тертя і площу контакту між робочою поверхнею і ґрунтом, а це є основною причиною збільшення критичної глибини і зменшення енергоємності розробки ґрунту.

Аналітична модель критичної глибини різання з урахуванням крайового ефекту наведена також у праці англійських вчених R.J. Godwina і G. Spoora [74]. На основі мінімізації горизонтальної складової сили різання отриманий алгоритм для визначення критичної глибини розробки ґрунту

$$d_c = \frac{-v \pm \sqrt{v^2 - 4ac'}}{2a}, \quad (1.17)$$

$$\begin{aligned} \text{де} \quad a &= 3\gamma N_\gamma \sin(\alpha + \delta) m \sin\left(\cos^{-1}\left(\frac{\operatorname{ctg}\alpha}{m}\right)\right); \\ v &= 2(cN_c + qN_q) m \sin\left(\cos^{-1}\left(\frac{\operatorname{ctg}\alpha}{m}\right)\right) \times \\ &\times \sin(\alpha + \delta) + 2\gamma N_\gamma \sin(\alpha + \delta) W - (1 - \sin\phi) \gamma W N'_q; \end{aligned}$$

$$c' = (cN_c + c_d N_d + qN_q) \sin(\alpha + \delta) W + c_d W \cos\alpha - W_c N'_c,$$

γ – щільність ґрунту;

N_γ, N_c, N_d, N_q – безрозмірні величини, які залежать від кутів α, φ, δ і отримані числовим аналізом за методом В. В. Соколовського [75, 76];

α, φ, δ – відповідно кути різання ножа, внутрішнього і зовнішнього тертя ґрунту;

m – відношення відстані, на яку руйнується ґрунт перед ножом, до критичної глибини різання;

W – ширина ножа;

c – зчеплення ґрунту;

c_d – адгезія ґрунту;

q – тиск на ножі.

Формула (1.17) дає реальні результати тільки для вертикального ножа ($\alpha = 90^\circ$). Для звичайних кутів різання ножа ($\alpha = 25\text{--}45^\circ$) розрахункові значення, особливо для зв'язних ґрунтів, виходять далеко за межі експериментальних даних.

До того ж алгоритм і методика розрахунку за ним є громіздкими, а тому не можуть бути використані для обґрунтування параметрів ґрунторозробних органів.

Найбільш достовірною для симетричного блокованого різання ґрунтів є математична модель С. В. Кравця [77, 78], яка враховує просторовість взаємодії ножа з ґрунтом за Ю. О. Ветровим [36], його геометричні параметри та фізико-механічні властивості ґрунтів

$$h_{\text{кр}} = \frac{\left(q_0 \frac{q_{\text{кр}} - q_0}{2} k_{\text{пер}} \right) \frac{\sin(\alpha_p + \varphi + \varphi_0 + \psi)}{\cos \varphi \cos \varphi_0 \sin \alpha_p} - \frac{c}{\sin \psi}}{\left(\text{ctg} \alpha_p + \text{ctg} \psi \right) \left[\xi \left(q_0 + \frac{q_{\text{кр}} - q_0}{3} k_{\text{пер}} \right) \cos \delta \cos \rho \text{tg} \alpha_0 + c \left(\frac{\rho}{\sin \psi} + \frac{\cos \delta}{\cos \lambda} \right) k_{\text{пер}} \right]}^{\theta_c}, \quad (1.18)$$

де $q_0 - q_{кр}$ – відповідно мінімальний нормальний тиск на ніж на денній поверхні та максимально можливий за несучою спроможністю ґрунту на критичній глибині;

$k_{пер}$ – відношення глибини зони гарантованого сколювання ґрунту до критичної глибини різання ($k_{пер} = 0,9-0,95$);

α_p – кут різання ножа;

φ, φ_0 – відповідно кути зовнішнього та внутрішнього тертя ґрунту;

ψ – кут поздовжнього зсуву ґрунту;

c – коефіцієнт зчеплення ґрунту;

ξ – коефіцієнт бокового тиску;

ρ, δ, λ – кути, що утворюються боковою площиною сколювання з вертикальною площею, визначаються згідно з [77].

Кут ψ визначається максимальним значенням глибини сколювання ґрунту. Коефіцієнт бокового тиску для верхнього ярусу (відносно денної поверхні) $\xi = 0$, а для нижніх ярусів $\xi > 0$.

Аналогічна модель отримана автором [77, 79] для напівблокованого різання, яка вказує на те, що критична глибина напівблокованого різання при однаковій ширині ножа b_c у 2 рази більша за критичну глибину блокованого різання.

Математичні моделі для визначення критичної глибини різання з метою їх спрощення та зручності користування апроксимовані (помилка апроксимації не перевищує 6,6%) залежностями

$$h_{кр} = \frac{a \times b_c}{(\operatorname{tg} \alpha_p)^n k_{пер}}, \quad (1.19)$$

де a і n – коефіцієнти апроксимації, які залежать від фізико-механічних властивостей ґрунту, чисельні значення яких наведені в [77, 80];

b_c – ширина скребка (різця).

Залежність (1.19) дає завищені результати розрахунку для кутів різання $\alpha_p = 20\text{--}30^\circ$.

У монографіях С. В. Кравця [77, 81] визначена критична глибина різання для комбінованого різання (верхній ярус – вільне різання, нижній ярус – блоковане різання), визначений вплив на критичну глибину комбінованого різання гідростатичного тиску, а також швидкості різання при блокуванні та комбінованій схемах руйнування.

У переважній більшості проаналізованих залежностей критична глибина різання прямо пропорційна ширині скребка (різця), що дозволяє регулювати критичну глибину різання шириною (товщиною) різця.

Довжина лемеша для сталого режиму різання визначається довжиною контакту лобової поверхні різця з ґрунтом непорушеної структури в момент попередній сколюванню чергового елемента стружки. Від цього параметра значною мірою залежить опір різанню. Аналіз літературних джерел щодо різання ґрунтів ножами на глибину сумірну з критичною показав, що довжина лемеша визначалась здебільшого експериментально. Дані спостережень мають обмежений частковий характер, оскільки заміри довжини лемеша є трудомісткою операцією, і в кожному окремому випадку проводять для конкретних геометричних параметрів ножа і типу ґрунту [36, 82, 83]. Слід акцентувати увагу на тому, що в літературі викладені результати досліджень для ножів, які розробляють ґрунт у верхньому ярусі в умовах симетричного блокованого різання. Крім того, не існує єдиної методики визначення довжини лемеша, а результати досліджень [36, 83–85] не враховують всього комплексу факторів, які впливають на довжину лемеша і крок сколювання елементів стружки.

Багатофакторна математична модель для визначення довжини лемеша ґрунторозробних органів, що здійснюють блоковане симетричне різання, відображена в роботах [77, 80]. Форма елемента стружки в процесі сталого

режиму різання прийнята згідно з результатами експериментальних досліджень (рис. 1.2) [36, 60, 82, 86].

На елементарний об'єм елемента стружки висотою dh в момент попередній сколюванню діють наступні сили, що приведені у вертикальну площину ОАД: активна сила dN' , яка направлена під кутом зовнішнього тертя ґрунту φ до нормалі лобової площини ножа; нормальна реакція dN_c та дотичні сили dT_c і $2dT_{\text{бок}} \cos \delta$ у площині зсуву ґрунту. На основі рівноваги всіх сил, що діють на елемент стружки в момент сколювання, отримана математична модель довжини лемеша різця, що здійснює симетричне блоковане різання на задану постійну докритичну глибину, яка не залежить від ширини різця.

$$l_c = \frac{-B_* - \sqrt{B_*^2 - 4A_*C_*}}{2A_*}, \quad (1.20)$$

$$\text{де} \begin{cases} A_* = \sin^2 \alpha_p (\cos \alpha_p + \cos \psi) c \\ B_* = 2 \sin \alpha_p (\operatorname{ctg} \alpha_p + \operatorname{ctg} \psi) ch_p - \frac{\sin(\alpha_p + \varphi + \varphi_0 + \psi)}{\cos \varphi + \cos \psi_0} q_{\text{сер}} \varepsilon_p \\ C_* = \frac{ch_p}{\sin \psi} (\varepsilon_p + \rho h_p \operatorname{ctg} \psi), \end{cases}$$

α_p – кут різання різця;

ψ – кут зсуву ґрунту поздовжній площині;

c – коефіцієнт зчеплення ґрунту;

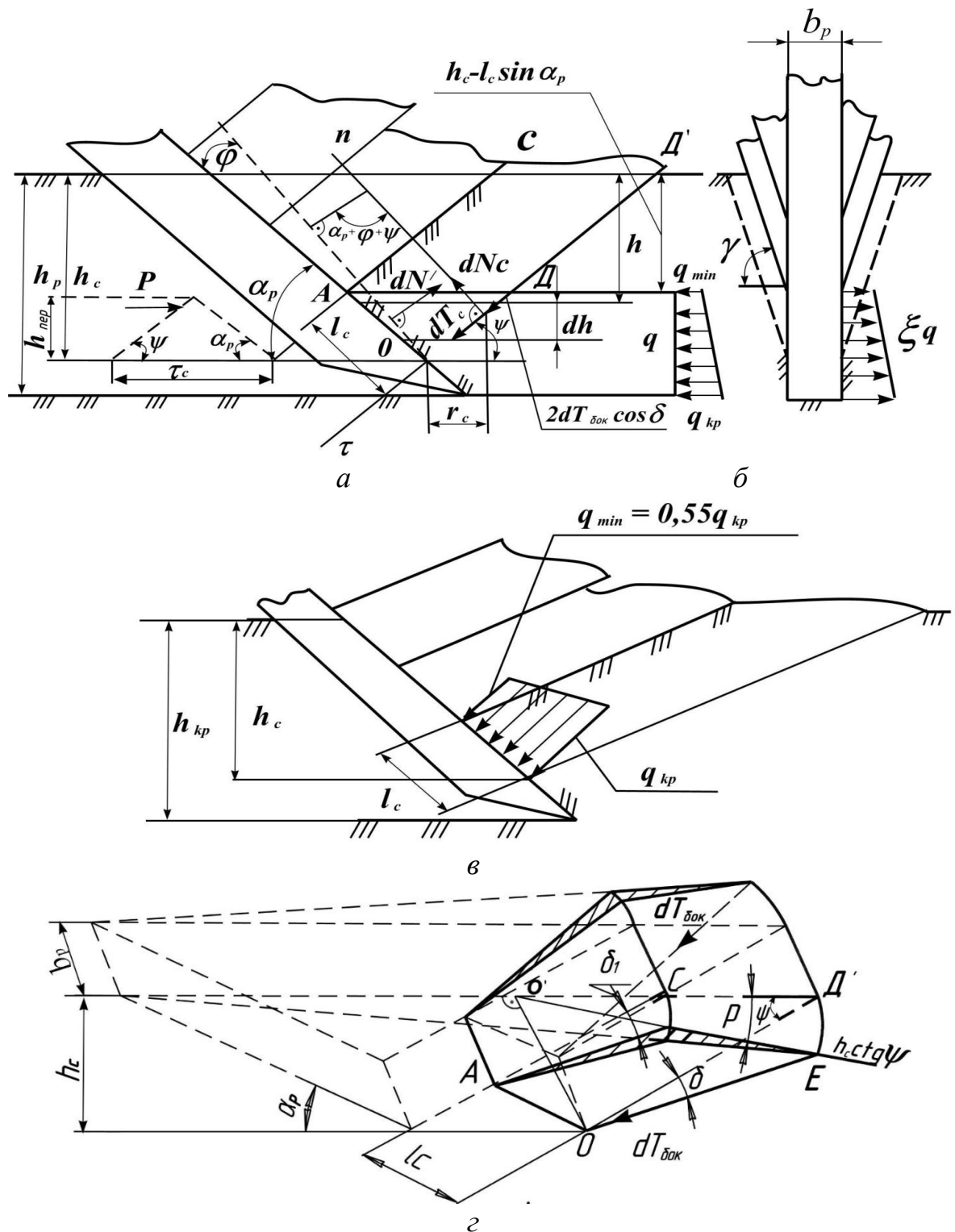
h_p – глибина різання;

φ, φ_0 – кути відповідно зовнішнього та внутрішнього тертя ґрунту;

$q_{\text{сер}}$ – середній нормальний тиск ґрунту на лобову площину ножа;

ε_p – ширина різця;

ρ – кут розвалу елемента стружки в плані.



а, б – схеми дії сил на елемент стружки у профільній і фронтальній площинах; в – схема розподілу тиску на ніж; г – форма елемента стружки при сталому режимі різання

Рисунок 1.2 – Схема для визначення довжини лемеша бокових різців багатоскребкового ланцюгового екскаватора

Через модель (1.20) визначається сила опору симетричного блокованого різання

$$P = q_{\text{сер}} \epsilon_p l_c (\sin \alpha_p + f \cos \alpha_p), \quad (1.21)$$

де $q_{\text{сер}}$ – середній тиск ґрунту на леміш;

$\epsilon_p l_c$ – відповідно ширина різця та довжина його лемеша;

α_p – кут різання різця;

f – коефіцієнт тертя ґрунту по матеріалу різця.

Математичні моделі (1.18)–(1.20) враховують усі суттєві фактори, підтверджені експериментально, в тому числі іншими авторами [36], а тому є найбільш достовірними та точними. Вони отримані для симетричного блокованого, напівблокованого та комбінованого різання. Але крайні бокові різці багатоскребкових траншейних екскаваторів працюють в умовах напівблокованого або асиметричного блокованого різання відповідно з блокуванням різця: тільки з одного боку вертикальною стінкою траншеї або з двох боків – з одного боку вертикальною стінкою, а з іншого – ґрунтом, який руйнується і має можливість вільного виходу на денну поверхню. Ці принципи роботи відрізняють їх від середніх різців. Останні здійснюють блоковане різання ґрунту з можливістю двостороннього симетричного (відносно різця) виходу ґрунту на денну поверхню, тому критична глибина різання та довжина лемеша для крайніх різців будуть іншими і їх необхідно визначити з урахуванням особливостей роботи цих різців.

1.5. Аналіз режимів роботи та алгоритмів визначення параметрів ланцюгових траншейних екскаваторів

Енергетичні характеристики розробки ґрунтів (енергоємність) та продуктивність землерийних машин безперервної дії визначаються конструкцією та режимами роботи ґрунторозробних робочих органів.

Зрозуміло, що величина енергоємності робочого процесу визначається також властивостями ґрунтів, що розробляються, можливостями варіювання співвідношення швидкостей подачі та різання ґрунту з метою вибору найвигіднішого режиму копання. Щоб забезпечити стабільну товщину стружки за умови зміни робочої швидкості подачі необхідно пропорційно змінювати швидкість різання ґрунту, забезпечуючи стабільність відношення цих швидкостей [34].

М. Л. Файнзільберг [87] дослідив, що максимальну продуктивність на міцних ґрунтах забезпечує режим роботи траншейного екскаватора з максимальним коефіцієнтом використання двигуна за потужністю та крутним моментом на робочому органі, а на слабких – з максимальним коефіцієнтом використання двигуна за потужністю і заповненням ковшів. Реалізація вказаних режимів роботи вимагає безступінчастого регулювання швидкості робочого органа та рушія. У випадку 2-ступінчастого регулювання швидкості робочого органа та безступінчастого регулювання швидкості рушія продуктивність екскаватора знижується на 15–20 %.

Є. З. Позін [88] оптимальні параметри стружки пов'язує з робочими характеристиками машини: швидкістю різання та швидкістю подачі у забій. За допомогою методів лінійного програмування показано, що з обмеженням, наприклад, за виносною здатністю транспортувального органа мінімум енергоємності може не співпадати з максимальною продуктивністю машини. В цьому випадку оптимальним необхідно вважати режим роботи екскаватора, що забезпечує досягнення найбільшої продуктивності, оскільки залежність продуктивності від швидкості подачі у забій описується монотонно зростаючою функцією.

Дослідженнями В. А. Ковригіна [89] показано, що за максимального способу зміни швидкостей різання та подачі проходять із застосуванням засобів, що здійснюють експериментальний пошук значень товщини стружки, що зрізається, та досягненням мінімальної енергоємності розробки ґрунту і як наслідок, підвищення продуктивності екскаватора. Застосування способу параметричної стабілізації допускає наявність попередньої інформації про

оптимальне співвідношення параметрів стружки ґрунту, що зрізається, для кожного типу ґрунту. Це співвідношення підтримується, як правило, автоматично за допомогою програмних пристроїв у екскаваторів з безступінчастим регулюванням робочих швидкостей. З цим погоджуються й інші дослідники [90–92].

А. Н. Стрельніков [93] також визначав раціональні режими роботи ланцюгових траншейних екскаваторів зі скребковим робочим органом типу ЕТЦ-165. Установлено, що при збільшенні тільки швидкості різання від 0,4 до 2,5 м/с без зміни швидкості подачі робочого органа у забій ($\vartheta_e = 0,008$ м/с) зусилля копанню при ширині траншеї 0,27 м зменшилося на 46,1 %, а при збільшенні швидкості подачі від 0,001 до 0,013 м/с без зміни швидкості різання ($\vartheta_p = 1,5$ м/с) воно збільшилося в 1,44 раза. При зміні кута нахилу робочого органа до горизонту від 0 до 75° зусилля копанню зменшилося на 28°. При збільшенні ширини робочого органа до 0,4 м зусилля копанню зросло у середньому на 50 %, а при збільшенні товщини стружки на ґрунтах II категорії в 4 рази питомий опір копанню зменшився на 44 %.

На ґрунтах I категорії зусилля копанню і тяговий опір робочого органа були мінімальні, а сумарна споживана потужність 5,65 кВт. Збільшити завантаження двигуна та підвищити продуктивність екскаватора не дозволяли обмеження по товщині стружки, що зрізається, та швидкості різання. При переході на ґрунти III категорії сумарна споживана потужність двигуна збільшилась до 17 кВт, що склало 41% потужності екскаватора. Через обмеження за виносною здатністю робочого органа та швидкості ланцюга неможливо досягнути повного завантаження двигуна базової машини. Виносну здатність робочого обладнання автор [93] пропонує збільшити за рахунок збільшення висоти різців і скребоків.

Збільшення товщини стружки на ґрунтах II категорії до 0,097 м дозволяє збільшити робочу швидкість екскаватора до 0,226 м/с. При цьому сумарна потужність на копання також зростає до 39 кВт, а коефіцієнт використання двигуна за потужністю збільшився до 0,9. На ґрунтах

III категорії максимальна товщина стружки, що зрізається, зменшується до 0,057 м за рахунок зниження робочої швидкості екскаватора до 0,129 м/с. Зростання швидкості ланцюга до 4,6 м/с дало можливість на ґрунтах I категорії збільшити швидкість подачі до 0,487 м/с. Таким чином, порівняно з базовим варіантом (ЕТЦ-165) збільшення виносної здатності робочого органа за рахунок висоти різців і скребків дало можливість автору [93] збільшити продуктивність екскаватора на ґрунтах I і II категорії у 4,3 рази, а на ґрунтах III категорії – у 2,5 рази. Сумісне збільшення виносної здатності та швидкості різання робочого органа сприяє підвищенню продуктивності екскаватора на ґрунтах I категорії у 9 разів, II категорії – у 4,8 рази, III категорії – у 2,9 рази. Подальше підвищення продуктивності обмежується потужністю двигуна базової машини.

Проведені дослідження вказують на те, що не існує методики проектування багатоскребкових ланцюгових траншейних екскаваторів, які можуть забезпечувати максимальну продуктивність машини та мінімальну енергоємність робочого процесу в залежності від ґрунтових умов, тобто оптимальних режимів роботи.

Відомі дві методики визначення параметрів і режимів роботи багатоскребкових ланцюгових траншейних екскаваторів. Одна з них пропонує визначати конструктивні параметри різців на основі заданої потужності двигуна базової машини та параметрів траншеї [35]. Інша - на основі технічної продуктивності, питомого опору копанню ґрунту та розмірів траншеї дозволяє визначити необхідну потужність двигуна базової машини [26]. Ці методики не гарантують, що робочий процес буде здійснюватися із споживанням мінімальної питомої енергоємності. Це стане можливим, якщо всі різці незалежно від типу різання та ґрунтових умов будуть руйнувати ґрунт на критичну глибину [36], від якої залежать абсолютні значення та співвідношення швидкостей та подачі робочого органа в забій. Тому В. Д. Мусійко [34] пропонує визначати оптимальний за конструкцією робочий орган, що забезпечує найбільшу швидкість подачі $\dot{V}_e$ в процесі копання

траншеї заданих розмірів з визначеною швидкістю різання $\mathcal{Q}_p$, але ці швидкості не визначені в залежності від геометричних параметрів різців, умов розвантаження та фізико-механічних властивостей ґрунтів. Для ланцюгових багатоскребкових траншейних екскаваторів за умов гравітаційного розвантаження ґрунту рекомендується раціональна швидкість $\mathcal{Q}_p = 1,25\text{--}2,5$ м/с. Вихідними (заданими) параметрами рекомендовано приймати: ширину різця та параметри траншеї – ширину та глибину [34].

1.6. Мета та завдання дослідження

У результаті проведеного аналізу та зроблених висновків визначено передумови створення критично-глибинних режимів роботи багатоскребкових ланцюгових траншейних екскаваторів [94], поставлена мета та завдання дослідження.

Метою дослідження є розробка методики та створення алгоритму визначення параметрів і режимів роботи ланцюгово-скребкових траншейних екскаваторів на основі критичноглибинного різання ґрунтів.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Визначити критичну глибину різання для крайніх бокових різців.
2. Визначити довжину лемеша крайніх бокових різців.
3. Визначити основні параметри робочого органа та режими роботи екскаватора, а саме: кут нахилу бокових розширень прорізу до горизонту, відстань між суміжними ґрунторозробними органами, число ліній різання і кількість різців, що знаходяться в забої, висоту скребків, швидкість різання та подачі, продуктивність, сумарну силу різання та інші.
4. Провести необхідні експериментальні дослідження.
5. Побудувати номограми для визначення основних параметрів та режимів роботи екскаваторів у залежності від геометричних параметрів різців, параметрів траншеї та ґрунтових умов.

Висновки за розділом 1

1. Ланцюгові багатоскребкові траншейні екскаватори розробляють ґрунт щодо сумісної, роздільної або комбінованої схем, із яких найбільш універсальною є сумісна схема з плоскими транспортувальними скребками, на яких у певному порядку закріплені клиноподібні різці (зуби). Порядок розставляння різців вибирають, як правило, тільки від ширини траншеї та форми різців.

2. Відомі аналітично-експериментальні моделі взаємодії багатоскребкових ланцюгових траншейних екскаваторів з ґрунтом не визначають параметри і режими їх роботи на основі критичноглибинного різання ґрунтів, а тому не забезпечують мінімальну питому енергоємність і максимальну продуктивність робочого процесу.

3. Для визначення критичної глибини різання розроблені математичні моделі для напівблокованого, блокованого та комбінованого різання, що здійснюють середні різці ланцюгових траншейних екскаваторів. Крайні бокові різці працюють в умовах блокування різця з одного боку вертикальною стінкою траншеї, а з іншого боку ґрунтом, що руйнується з можливістю вільного виходу на денну поверхню. Несиметричне блокування крайніх бокових різців не дозволяє визначити їх критичну глибину різання та довжину лемеша різців за відомими моделями. Ці параметри не визначені для крайніх різців і напівблокованого різання.

4. Відомі алгоритми визначення параметрів та режимів роботи багатоскребкових ланцюгових траншейних екскаваторів не дозволяють забезпечити максимальну продуктивність машини і мінімальну питому енергоємність робочого процесу в залежності від ґрунтових умов.

5. Необхідно розробити алгоритм визначення режимів і параметрів роботи на основі критичноглибинного різання ґрунтів усіма різцями, які знаходяться в забої в залежності від умов гравітаційного розвантаження скребків, їх геометричних параметрів та фізико-механічних властивостей ґрунтів.

Основні положення цього розділу викладені в публікації №94.

Розділ 2

ТЕОРЕТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ КРИТИЧНОГЛИБИННОГО
БЛОКОВАНОГО РІЗАННЯ ҐРУНТІВ РІЗЦЯМИ ЛАНЦЮГОВО-
СКРЕБКОВИХ ТРАНШЕЙНИХ ЕКСКАВАТОРІВ

2.1. Передумови теоретичного дослідження

Найбільш значущою складовою процесу копання ґрунту ланцюгово-скребковим робочим органом є різання ґрунту різцями (зубами) та скребками (балками) [2–4]. Під час розрахунку сил різання робочий орган приймається як складна механічна система ланцюгів і скребоків, на яких у визначеному порядку розставлені та закріплені різці з відомими геометричними параметрами. Відокремлення стружки від масиву ґрунту здійснюється скребками з різцями в умовах блокованого (симетричного та асиметричного) та вільного різання ґрунту. В схемах з блокованим та вільним різанням установлені також зачисні скребки без різців, що здійснюють вільне різання. Слід також урахувувати зміну питомого опору та енергоємності різання ґрунту зі зміною товщини стружки [36, 37, 60]. Мінімальна енергоємність руйнування ґрунту має місце на критичній глибині різання [36], яку необхідно визначати в кожному конкретному випадку. Якщо критичні глибини симетричного блокованого та напівблокованого різання визначені [77], то для асиметричного блокованого різання, в умовах якого працюють крайні бокові різці ланцюгово-скребкових траншеєкопачів, критична глибина невідома. Також невизначеними є довжини лемешів цих різців і опір їх різанню. Тому для налаштування всіх різців на критичноглибинні режими роботи необхідно визначити критичну глибину асиметричного блокованого різання крайніми боковими різцями, а також їх довжину лемешів. Крім того, для налаштування всіх різців на критичноглибинні режими роботи необхідно визначити абсолютні значення швидкості різання та робочої швидкості екскаватора в

залежності від параметрів траншеї та ґрунтових умов [34]. Також необхідно визначити число ліній різання, кількість балок, висоту скребків тощо.

Модель ґрунту та схему його руйнування прийнято з наступними припущеннями: ґрунт розглядається як суцільне однорідне ізотропне середовище, яке характеризується механічним складом, пластичністю, зчепленням, внутрішнім, зовнішнім тертям і щільністю. Руйнування ґрунту проходить, як правило, за рахунок деформацій зрізу та зсуву після порушення рівноваги діючих сил на елемент стружки, який розглядається як тверде тіло, опір відокремлення якого від ґрунтового середовища не залежить від швидкості робочого інструменту [80].

Вихідними даними для теоретичних досліджень є:

- ширина різців $b_{\text{бл.}}$;
- їх кут різання α_p ;
- максимальна глибина траншеї H ;
- ширина траншеї B ;
- фізико-механічні характеристики ґрунтів (коефіцієнт зчеплення c);
- питома сила тяжіння $\gamma_{\text{гр}}$;
- кути внутрішнього ϕ_0 ;
- зовнішнього ϕ тертя.

2.2. Визначення критичної глибини різання ґрунту крайніми боковими різцями та їх ширини

Копання траншей багатоківшевыми та одноківшевыми екскаваторами здійснюється в умовах обмеження робочих органів боковими вертикальними стінками. Руйнування ґрунту встановленими на робочих органах екскаваторів крайніми боковими різцями (зубами) здійснюється з обмеженням робочого процесу цими вертикальними стінками з одного боку різця. З іншого боку різець

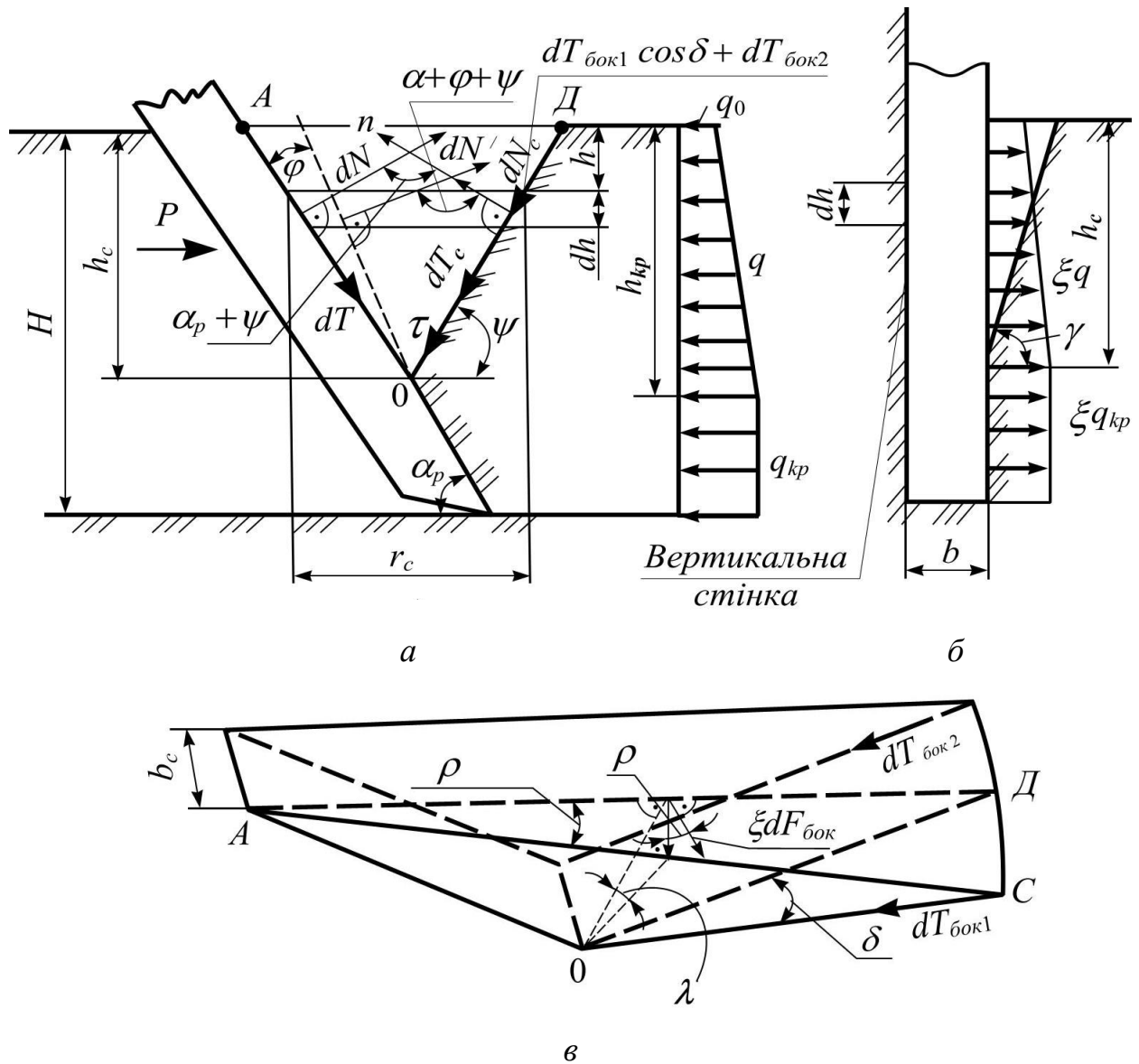
при взаємодії з масивом ґрунту утворює проріз з одностороннім розвалом. В такому випадку різець здійснює блоковане асиметричне різання.

Відомо, що збільшення глибини різання ножа до критичної глибини $h \leq h_{кр}$ призводить до зменшення енергоємності робочого процесу, тому що інтенсивність зростання опору різанню менша, ніж площі поперечного перерізу прорізу [36, 85]. При $h > h_{кр}$ збільшується інтенсивність зростання опору різанню ножа за рахунок задавлювання ґрунту в бічні стінки прорізу, а площа руйнування зменшується через неможливість впливу на процес руйнування та витиснення ґрунту назовні. В результаті підвищується енергоємність робочого процесу. Тому розрахунок параметрів багатоківшевих і одноківшевих траншейних екскаваторів необхідно здійснювати на основі критичноглибинного різання ґрунтів.

Середні різці ланцюгово-скребкових траншейних екскаваторів, як правило, працюють в умовах блокованого симетричного, а крайні бокові різці – в умовах блокованого асиметричного різання. При цьому абсолютні значення критичної глибини для симетричного та асиметричного різання повинні бути рівними. Критичні глибини блокованого симетричного різання визначені в літературі [77–81]. Щодо критичної глибини блокованого асиметричного різання інформація відсутня.

Визначимо критичну глибину блокованого асиметричного різання ґрунту в траншеї біля вертикальної стінки, яка обмежує простір руйнування різця з одного боку. З цією метою розроблена розрахункова схема взаємодії прямолінійного різця з ґрунтом (рис. 2.1) [94]. Задача вирішується при відомих припущеннях [77].

На елементарний об'єм елемента стружки висотою dh в момент попередній сколюванню ґрунту різцем діють наступні сили, які приведені у вертикальну площину ОАД (див. рис. 2.1, а): активна сила $dN' = \frac{dN}{\cos \varphi}$, яка направлена під кутом зовнішнього тертя ґрунту φ до нормалі лобової площини різця; нормальна реакція dN_c і дотичні сили dT_c , $dT_{бок} \cdot \cos \delta$ і $dT_{бок2}$ приведені в площину зсуву ґрунту.



а – у поздовжній площині; б – у поперечній площині;
в – форма елемента стружки у процесі заглиблення ножа

Рисунок 2.1 – Схема взаємодії бокового крайнього різця з ґрунтом при блокованому асиметричному різанні:

Тоді система рівнянь рівноваги всіх сил на нормальну (n) і дотичну (τ) осі до лобової площини сколювання мають вигляд (2.1). З першого рівняння системи (2.1) отримаємо (2.2).

$$\begin{cases} \sum P_n = dN_c + dN' \cos(\alpha_p + \varphi + \psi) = 0; \\ \sum P_\tau = dT_c + dT_{бок1} \cos \delta + dT_{бок2} - dN' \sin(\alpha_p + \varphi + \psi); \end{cases} \quad (2.1)$$

$$dN_c = -\frac{dN}{\cos \varphi} \cos(\alpha_p + \varphi + \psi) = -\frac{qb_p}{\cos \varphi \cdot \sin \alpha_p} \cos(\alpha_p + \varphi + \psi) dh \quad (2.2)$$

де q – закон розподілення нормального тиску на лобову площину різця по глибині;

b_p – ширина різця;

φ – кут зовнішнього тертя ґрунту;

α_p – кут різання різця;

ψ – кут зсуву ґрунту різцем в поздовжній площині;

dh – елементарна глибина різання.

Закон розподілення нормального тиску на ніж по глибині обґрунтований у літературі [37, 77–80] і репрезентований у вигляді

$$q = q_0 + \frac{q_{кр} - q_0}{h_c} k_{пер} h \quad (2.3)$$

де q_0 , $q_{кр}$ – відповідно мінімальний тиск на денній поверхні та максимально можливий тиск по несучій спроможності ґрунту (критичний тиск) визначається за відомими залежностями [2, 4];

$k_{пер}$ – відношення глибини гарантованого сколювання ґрунту h_c до критичної глибини різання $h_{кр}$ (перехідний коефіцієнт $k_{пер} = 0,9–0,95$);

h – поточне значення глибини.

З урахуванням (2.3) вираз (2.2) перепишеться таким чином

$$dN_c = \frac{-\cos(\alpha_p + \varphi + \psi)}{\cos \varphi \sin \alpha_p} b_p \left(q_0 + \frac{q_{кр} - q_0}{h_c} k_{пер} h \right) dh. \quad (2.4)$$

Елементарні дотичні сили, які діють у лобовій (dT_c) і бокових ($dT_{бок1}$, $dT_{бок2}$) площинах сколювання визначаються за законом Кулона для ґрунтів

$$dT_c = \operatorname{tg} \varphi_0 dN_c + c dF_c; \quad (2.5)$$

$$dT_{бок1} = (\xi q \cos \rho \cos \lambda \operatorname{tg} \varphi_0 + c) dF_{бок1}; \quad (2.6)$$

$$dT_{\text{бок2}} = (\xi q \operatorname{tg} \varphi_0 + c) dF_{\text{бок2}} \quad (2.7)$$

де φ_0 – кут внутрішнього тертя ґрунту;

c – коефіцієнт зчеплення ґрунту;

ξ – коефіцієнт бокового тиску елемента ґрунтової стружки;

dF_c , $dF_{\text{бок1}}$, $dF_{\text{бок2}}$ – елементарні площі відповідно лобової і бокових площин сколювання;

ρ , δ , λ – кути що утворюються боковою площиною сколювання з паралельною вертикальній боковій стінці траншеї площиною (див. рис. 2.1, в).

При цьому елементарні площі відповідно дорівнюють:

$$dF_c = (b_p + \rho r_c) \frac{dh}{\sin \psi} = \left[b_p + \rho (\operatorname{ctg} \alpha_p + \operatorname{ctg} \psi) (h_c - h) \right] \frac{dh}{\sin \psi}, \quad (2.8)$$

$$dF_{\text{бок1}} = r_c \frac{dh}{\cos \lambda} = (\operatorname{ctg} \alpha_p + \operatorname{ctg} \psi) (h_c - h) \frac{dh}{\cos \alpha}, \quad (2.9)$$

$$dF_{\text{бок2}} = r_c \cdot dh = (\operatorname{ctg} \alpha_p + \operatorname{ctg} \psi) (h_c - h) dh, \quad (2.10)$$

де r_c – поточне значення радіуса сколювання ґрунту.

Якщо підставити вирази (2.5)–(2.7) в друге рівняння системи (2.1) з урахуванням залежностей (2.4), (2.8)–(2.10) і проінтегрувати його в межах від 0 до h_c , то після проміжних алгебраїчно-тригонометричних перетворень отримаємо рівняння:

$$\begin{aligned} & \frac{\operatorname{ctg} \alpha_p + \operatorname{ctg} \psi}{2} \left\{ \left[\frac{c\rho}{\sin \psi} + c \left(1 + \frac{\cos \delta}{\cos \lambda} \right) \right] + \right. \\ & \left. + \xi \left(q_0 + \frac{q_{\text{кр}} - q_0}{3} k_{\text{пер}} \right) \cos \rho \cos \delta \cdot \operatorname{tg} \varphi_0 + \xi \operatorname{tg} \varphi_0 \right\} h_c = \\ & = \left[\left(q_0 + \frac{q_{\text{кр}} - q_0}{2} k_{\text{пер}} \right) \frac{\sin (\alpha_p + \varphi + \varphi_0 + \psi)}{\cos \varphi \cos \varphi_0 \sin \alpha_p} - \frac{c}{\sin \psi} \right] b_p. \end{aligned} \quad (2.11)$$

Звідки

$$h_{кр} = \frac{h_c}{k_{пер}} = \frac{\left(q_0 + \frac{q_{кр} - q_0}{2} k_{пер} \right) \frac{\sin(\alpha_p + \varphi + \varphi_0 + \psi)}{\cos \varphi \cos \varphi_0 \sin \alpha_p} - \frac{c}{\sin \psi}}{\frac{\operatorname{ctg} \alpha_p + \operatorname{ctg} \psi}{2} k_{пер} \left[c \left(1 + \frac{\rho}{\sin \psi} + \frac{\cos \delta}{\cos \lambda} \right) + \right.} \quad (2.12)$$

$$\left. + \xi \left(q_0 + \frac{q_{кр} - q_0}{3} k_{пер} \right) \operatorname{tg} \varphi_0 (1 + \cos \rho \cos \delta) \right]$$

Кути ρ , δ , λ визначаються із геометричних співвідношень (див. рис. 2.1, в) [77–80]. Кут нахилу бокової площини елемента стружки до горизонту γ визначається за залежністю (2.16), [81]

$$\cos \rho = \sqrt{1 - \left(\frac{\operatorname{ctg} \gamma}{\operatorname{ctg} \alpha_p + \operatorname{ctg} \psi} \right)^2}; \quad (2.13)$$

$$\cos \lambda = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\operatorname{ctg} \alpha_p \operatorname{ctg} \gamma}{\operatorname{ctg} \alpha_p + \operatorname{ctg} \psi} \right)^2}}; \quad (2.14)$$

$$\cos \delta = 1 - 2 \left(\operatorname{ctg} \alpha_p + \operatorname{ctg} \psi \right)^2 \sin^2 \psi \sin^2 \frac{\rho}{2}; \quad (2.15)$$

$$\gamma = \arccos \left[\frac{c \cdot \cos \varphi_0}{\left(1 - 0,74 \operatorname{tg} \varphi_0 - \frac{1,52 \cdot c}{q_{кр}} \right) q_{сер}} \right] - \varphi_0; \quad (2.16)$$

$$q_{сер} = \frac{q_0 + q_{кр}}{2}. \quad (2.17)$$

Математична модель (2.12) може бути використана для визначення критичної глибини різання за поярусною розробкою ґрунту. Умови руйнування ґрунту неідентичні у верхньому та наступних нижніх ярусах. Внаслідок впливу денної поверхні верхній ґрунторозробний орган (різець)

працює в умовах блокованого асиметричного різання: з одного боку різець обмежений боковою вертикальною стінкою траншеї, з іншого – масивом ґрунту, що руйнується і виходить на денну поверхню. В результаті утворюється проріз з боковим одностороннім розвалом з боку денної поверхні ($\rho > 0$), а з іншого боку з вертикальною стінкою ($\rho = 0$) (див. рис. 2.1). Зі сторони бокового розвалу ґрунт руйнується переважно за рахунок деформації відриву [36, 85], а тому на боковій площині елемента стружки з розвалом відсутні бічний тиск і сили тертя ($\xi q = 0$). З боку вертикальної стінки ґрунт руйнується за рахунок деформації зрізу та зсуву, а тому на вертикальній бічній площині елемента стружки виникають нормальний тиск ($\xi q > 0$) і сили тертя ($\xi q \operatorname{tg} \varphi_0 > 0$). При цьому верхній різець створює вільний простір з розміром b_p денної поверхні для виходу ґрунту із нижнього ярусу. Внаслідок цього нижні ґрунторозробні органи формують прямокутну щілину ($\rho = 0$). Формування прорізу в нижньому ярусі здійснюється також за рахунок деформацій зрізу та зсуву ($\xi q > 0$; $\xi q \operatorname{tg} \varphi_0 > 0$).

З урахуванням цих особливостей залежність (2.12) для визначення критичної глибини асиметричного блокованого різання у верхньому ярусі перепишеться таким чином:

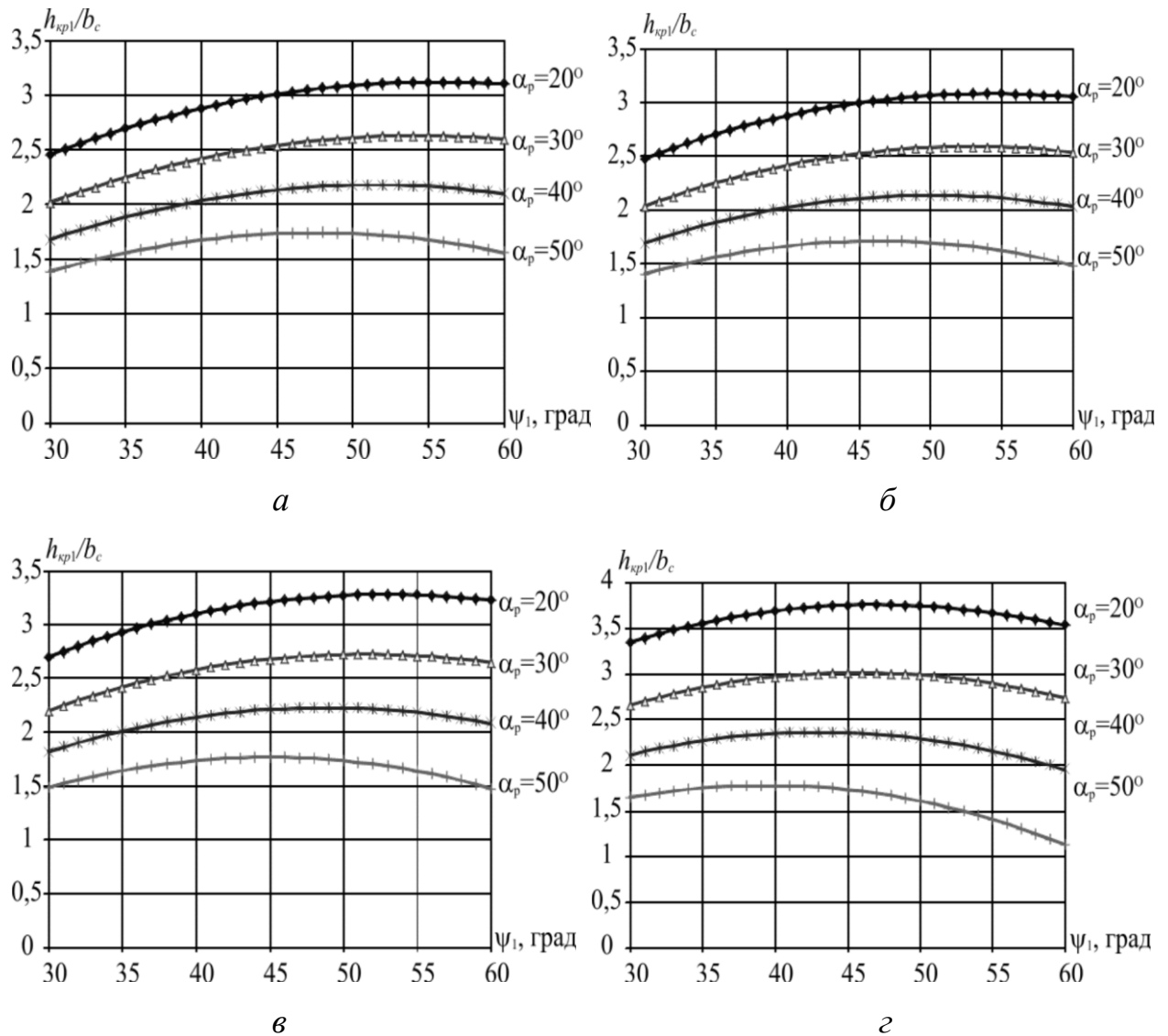
$$h_{\text{кр}1} = \frac{\left(q_0 + \frac{q_{\text{кр}} - q_0}{2} k_{\text{пер}} \right) \frac{\sin(\alpha_p + \varphi + \varphi_0 + \psi)}{\cos \varphi \cos \varphi_0 \sin \alpha_p} - \frac{c}{\sin \psi} b_p}{\frac{\operatorname{ctg} \alpha_p + \operatorname{ctg} \psi}{2} k_{\text{пер}} \left[c \left(1 + \frac{\rho}{\sin \psi} + \frac{\cos \delta}{\cos \lambda} \right) + \right.} \quad (2.18)$$

$$\left. ++ \xi \left(q_0 + \frac{q_{\text{кр}} - q_0}{3} k_{\text{пер}} \right) \operatorname{tg} \varphi_0 \right].$$

У залежності (2.18) параметр ψ є невідомим. Визначається він на припущенні, що для $h_p \geq h_{\text{кр}}$ значення кута сколювання ψ встановлюється кожний раз таким, що опір різанню ножа буде мінімальним [77]. При заданій глибині різання $h_p > h_{\text{кр}}$ мінімальний опір різанню ножа можливий при

мінімальній площі епюри нормального тиску, а це буде, якщо $h_{кр} = \frac{h_c}{k_{пер}} = \max$ і $h_c = \max$. Таким чином, кут зсуву ґрунту визначається максимальним значенням глибини сколювання [37, 77–81].

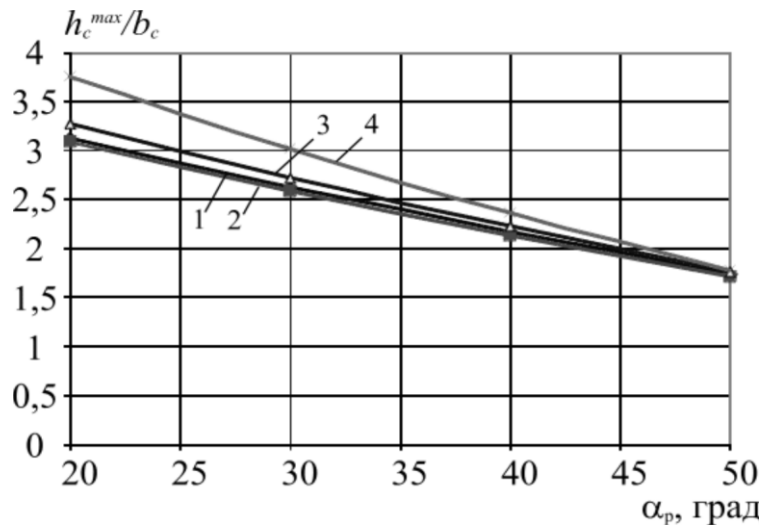
Залежності відносної критичної глибини різання у верхньому ярусі від кута зсуву ґрунтів наведені на рис. 2.2, а від кута різання різця – на рис. 2.3.



а – тугопластична глина; б – напівтверда глина;

в – напівтвердий суглинок; г – твердий супісок

Рисунок 2.2 – Залежність відносної критичної глибини асиметричного блокованого різання боковими різцями від кута зсуву ґрунтів



1, 2 – для тугопластичної та твердої глини;

3 – напівтвердий суглинок; 4 – твердий супісок

Рисунок 2.3 – Залежність відносної критичної глибини різання ґрунтів від кута різання бокових різців, що здійснюють асиметричне блоковане різання

Розрахункові залежності показують, що при зменшенні кута різання різця від 50° до 20° відносна критична глибина блокованого асиметричного різання $\left(\frac{h_{кр1}}{b_p}\right)$ збільшується: для напівтвердої та тугопластичної глини від 1,71 до 3,12; для напівтвердого суглинка від 1,76 до 3,27; для твердого супіску від 1,78 до 3,75.

Математична модель (2.18) є громіздкою та незручною для розрахунку критичної глибини різання. З метою її спрощення проведена апроксимація в межах кута різання різця $\alpha_p = 20\text{--}50^\circ$. Помилка апроксимації не перевищує 3,4%. У результаті отримана лінійна спадна залежність

$$\frac{h_{кр1}}{b'_p} = a' - n' \cdot \alpha_p, \quad (2.19)$$

де a' і n' – коефіцієнти апроксимації, що залежать від типу ґрунту;

α_p – кут різання різця в градусах.

Значення коефіцієнтів апроксимації для бокових різців наведені в табл. 2.1

Таблиця 2.1 – Значення коефіцієнтів апроксимації для блокованого асиметричного різання

Тип ґрунту \ Тип різання	Блоковане асиметричне	
	a'	n'
Тугопластична глина	4,02	0,046
Напівтверда глина	3,98	0,046
Напівтвердий суглинок	4,26	0,050
Твердий супісок	5,02	0,066

Отримані математичні моделі (2.18), (2.19) дозволяють у кожному конкретному випадку на основі вихідних даних про талі ґрунти, що рекомендують БНіП, залежно від кута різання різця в межах його зміни 20–50° визначити критичну глибину різання для крайніх бокових різців багатоскребкових ланцюгових траншейних екскаваторів.

Абсолютні значення критичної глибини різання для середніх і бокових різців різні, тому що середні різці працюють в умовах блокованого симетричного різання, а крайні бокові різці – в умовах блокованого асиметричного різання.

В роботі [94] та залежністю (2.19) показано, що як для симетричного, так і для асиметричного блокованого різання критична глибина різання прямо пропорційна ширині різця. Тому ширину бокових крайніх різців визначимо шляхом прирівнювання критичної глибини різання бокових і середніх різців

$$(a' - n'\alpha_p)b'_p = \frac{ab_{\text{бл}}}{(\text{tg}\alpha_p)^n k_{\text{пер}}} \quad (2.20)$$

звідки

$$b'_p = \frac{a \cdot b_{\text{бл}}}{(\text{tg} \alpha_p)^n k_{\text{пер}} (a' - n' \alpha_p)} \quad (2.21)$$

де b'_p , $b_{\text{бл}}$ – відповідно ширина крайніх і середніх різців;

a' , n' , a , n – відповідно коефіцієнти апроксимації для крайніх і середніх різців, що залежать від фізико-механічних властивостей ґрунтів.

Значення коефіцієнтів a і n наведені в літературі [26, 37, 77, 80, 81], а коефіцієнтів a' , n' – в табл. 2.1.

Так, наприклад, для напівтвердого суглинку ширина крайніх бокових різців, що здійснюють асиметричне блоковане різання, більша за ширину середніх різців: $b'_p = 2,05b_{\text{бл}}$ для $\alpha_p = 20^\circ$; $b'_p = 1,74b_{\text{бл}}$ для $\alpha_p = 30^\circ$ і для $\alpha_p = 60^\circ$; $b'_p = 1,63b_{\text{бл}}$ для $\alpha_p = 40^\circ$ і для $\alpha_p = 50^\circ$.

Математичні моделі отримані для визначення критичної глибини різання для бокових крайніх різців багатоскребкових ланцюгових траншейних екскаваторів, що працюють в умовах блокованого асиметричного різання.

Розрахункові значення відносної критичної глибини блокованого асиметричного різання для бокових крайніх різців змінюється відповідно в межах (при зміні кута різання $\alpha_p = 50-20^\circ$): для тугопластичної глини

$$\frac{h_{\text{кр1}}}{b_p} = 1,71 - 3,12; \text{ для напівтвердого суглинку } \frac{h_{\text{кр1}}}{b_p} = 1,76 - 3,27; \text{ для твердого}$$

$$\text{супіску } \frac{h_{\text{кр1}}}{b_p} = 1,78 - 3,75; \text{ для напівтвердої глини } \frac{h_{\text{кр1}}}{b_p} = 1,71 - 3,08.$$

Математичні моделі відносної критичної глибини блокованого асиметричного різання для бокових крайніх різців апроксимуються (помилка апроксимації не перевищує 3,4 %) лінійною залежністю від кута різання (2.19).

Крім того, визначена ширина бокових крайніх різців, яка забезпечує рівність критичних глибин різання бокових і середніх різців.

2.3. Визначення довжини лемеша та сили різання ґрунту різцями (зубами) траншейних екскаваторів

Лемешем називається нижня частина різця біля різальної кромки, що контактує з ґрунтом непорушеної структури в момент відділення елемента стружки від масиву. Від геометричних параметрів лемеша (довжини, ширини та кута різання) значною мірою залежить опір різанню різця.

Аналіз літературних джерел інформації щодо різання ґрунтів ножами на глибину, сумірну з критичною показав, що довжина лемеша визначалася переважно експериментально. Дані спостережень мають обмежений частковий характер, оскільки заміри довжини лемеша є трудомісткою операцією, та в кожному конкретному випадку їх отримують для конкретних кута різання і ширини ножа та типу ґрунту. Крім того, не існує єдиної методики визначення довжини лемеша, а результати досліджень [36, 83–85] не враховують усього комплексу факторів, що впливають на довжину лемеша та крок відокремлення елементів стружки.

Відома аналітична багатофакторна модель для визначення довжини лемеша для блокованого симетричного різання ґрунту [77, 80], але її неможливо використати для бокових різців багатоскребкових ланцюгових траншейних екскаваторів, тому, що праві і ліві бокові різці траншейних екскаваторів працюють в умовах блокованого асиметричного різання. Це є гальмівною причиною для визначення сили опору різання боковими різцями та дослідження робочого процесу багатоскребкових траншейних екскаваторів. З метою визначення геометричних параметрів лемеша, що здійснює блоковане асиметричне різання ґрунту, розроблена розрахункова схема (рис. 2.4) [95].

На елементарний об'єм елемента стружки висотою dh в момент попередній відокремленню його від масиву ґрунту діють наступні сили, що приведені у вертикальну площину ОАД (рис. 2.4, а): активна сила dN' , що направлена під кутом зовнішнього тертя ґрунту φ до нормалі лобової площини різця; нормальна реакція dN_c і дотичні сили dT_c та $dT_{\text{бок1}} \cos \delta + dT_{\text{бок2}}$ у площині зсуву ґрунту.

В момент відокремлення елемента стружки настає рівновага всіх діючих на нього сил. Тоді система рівнянь рівноваги всіх сил на нормальну (n) і дотичну (τ) осі до площини руйнування мають такий вигляд:

$$\begin{cases} \sum P_n = dN_c + dN' \cos(\alpha_p + \varphi + \psi) = 0 \\ \sum P_\tau = dT_c + dT_{\text{бок1}} \cos \delta + dT_{\text{бок2}} - dN' \sin(\alpha_p + \varphi + \psi) = 0 \end{cases} \quad (2.22)$$

де α_p – кут різання різця;

ψ – кут зсуву ґрунту в поздовжній площині.

Із першого рівняння системи (2.22) визначаємо

$$\begin{aligned} dN_c &= -dN' \cos(\alpha_p + \varphi + \psi) = -\frac{dN}{\cos \varphi} \cos(\alpha_p + \varphi + \psi) = \\ &= -qdF \frac{\cos(\alpha_p + \varphi + \psi)}{\cos \varphi} = -\frac{\cos(\alpha_p + \varphi + \psi)}{\cos \varphi \sin \alpha_p} qb_p dh. \end{aligned} \quad (2.23)$$

Відомо [77, 83], що тиск від ножа розповсюджується тільки в пластичній зоні ОАД елемента стружки (див. рис. 2.4, а). Тому

$$\begin{cases} q = q_{\text{сер}}, & \text{якщо } h \geq h_c - l_c \sin \alpha_p \\ q = 0, & \text{якщо } h < h_c - l_c \sin \alpha_p \end{cases}, \quad (2.24)$$

де q – тиск ґрунту на леміш;

b_p – ширина різця (різання);

h – поточне значення глибини;

h_c – глибина зони сколювання ґрунту;

l_c – довжина лемеша в перехідній зоні (зоні стружкоутворення).

Закон зміни середнього тиску на лемеші, як це показано в [77, 80], прийнятий лінійним за глибиною різання h_p

$$q_{\text{сер}} = \frac{q_{\text{кр}}}{2} + \frac{0,55q_{\text{кр}}}{2} \cdot \frac{h_p}{h_{\text{кр}}}, \quad (2.25)$$

де $q_{кр}$ – максимальний тиск на леміш, що визначається несучою спроможністю ґрунту;

$h_{кр}$ – критична глибина різання.

Якщо $h_p = h_{кр}$

$$q_{сер} = 0,78q_{кр}. \quad (2.26)$$

Елементарні дотичні сили, що діють у лобовій (dT_c) і бічних площинах ($dT_{бок1}$ і $dT_{бок2}$) сколювання, визначаються за законом Кулона для ґрунтів. При визначенні сили $dT_{бок1}$ у верхньому ярусі відповідно до рекомендацій [77] необхідно прийняти $\xi q_{сер} = 0$.

$$dT_c = \operatorname{tg} \varphi_0 dN_c + c dF_c; \quad (2.27)$$

$$dT_{бок1} = (\xi q_{сер} \cos \delta \operatorname{tg} \varphi_0 + c) dF_{бок1}; \quad (2.28)$$

$$dT_{бок2} = (\xi q_{сер} \operatorname{tg} \varphi_0 + c) dF_{бок2}, \quad (2.29)$$

де dF_c , $dF_{бок1}$, $dF_{бок2}$ – елементарні площі відповідно до лобової та бокових площин зсуву;

ξ – коефіцієнт бічного тиску ґрунту;

φ_0 – кут внутрішнього тертя ґрунту.

Елементарні площі дорівнюють

$$dF_c = (b_p + \rho r_c) \frac{dh}{\sin \psi} = [b_p + \rho(h_c - h) \operatorname{ctg} \psi] \frac{dh}{\sin \psi}; \quad (2.30)$$

$$dF_{бок1} = (h_c - h) (\operatorname{ctg} \alpha_p + \operatorname{ctg} \psi) \frac{dh}{\cos \delta}, \quad \text{якщо } h \geq h_c - l_c \sin \alpha_p; \quad (2.31)$$

$$dF_{бок1} = l_c \sin \alpha_p (\operatorname{ctg} \alpha_p + \operatorname{ctg} \psi) \frac{dh}{\cos \delta}, \quad \text{якщо } h < h_c - l_c \sin \alpha_p; \quad (2.32)$$

$$dF_{\text{бок2}} = (h_c - h)(\text{ctg}\alpha_p + \text{ctg}\psi)dh, \quad \text{якщо } h \geq h_c - l_c \sin \alpha_p; \quad (2.33)$$

$$dF_{\text{бок2}} = l_c \sin \alpha_p (\text{ctg}\alpha_p + \text{ctg}\psi)dh, \quad \text{якщо } h < h_c - l_c \sin \alpha_p, \quad (2.34)$$

де ρ , δ – кути, що утворюються площинами зсуву з вертикальною площиною;

r_c – поточне значення радіуса зсуву ґрунту.

Кути ρ і δ визначаються з геометричних співвідношень (див. рис. 2.4, г)

$$\rho = \arcsin\left(\frac{\text{tg}\psi}{\text{tg}\gamma}\right); \quad (2.35)$$

$$\cos \delta = 1 - \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{\text{tg}\psi}{\text{tg}\gamma}\right)^2} \right] \cos^2 \psi, \quad (2.36)$$

де γ – кут бічного сколювання ґрунту у вертикальній фронтальній площині визначається відповідно [81].

Для підсумку сил по боковій поверхні елемента стружки підставимо вирази (2.27)– (2.29) в друге рівняння системи (2.22) та з урахуванням рівності (2.23), (2.30)–(2.34) проінтегруємо його в межах від 0 до h_c

$$\begin{aligned} & -\text{tg}\varphi_0 \frac{\cos(\alpha_p + \varphi + \psi)}{\cos \varphi \sin \alpha_p} q_{\text{cep}} b_p \int_{h_c - l_c \sin \alpha_p}^{h_c} dh + \frac{c}{\sin \psi} \int_0^{h_c} [b_p + \rho(h_c - h) \text{ctg}\psi] \times \\ & \times dh + (\xi q \cos \delta \text{tg}\varphi_0 + c) (\text{ctg}\alpha_p + \text{ctg}\psi) \int_{h_c - l_c \sin \alpha_p}^{h_c} (h_c - h) dh + 2c \times \\ & \times l_c \sin \alpha_p (\text{ctg}\alpha_p + \text{ctg}\psi) \int_0^{h_c - l_c \sin \alpha_p} dh + (\xi q \text{tg}\varphi_0 + c) (\text{ctg}\alpha_p + \text{ctg}\psi) \times \\ & \times \int_{h_c - l_c \sin \alpha_p}^{h_c} (h_c - h) dh - \frac{\sin(\alpha_p + \varphi + \psi)}{\cos \varphi \sin \alpha_p} q_{\text{cep}} b_p \int_{h_c - l_c \sin \alpha_p}^{h_c} dh = 0. \end{aligned} \quad (2.37)$$

Після інтегрування виразу (2.37) та проведення проміжних математичних перетворень отримаємо квадратне рівняння для визначення довжини лемеша в перехідній зоні верхнього ярусу

$$\begin{aligned} & \frac{\sin^2 \alpha_p}{2} (\operatorname{ctg} \alpha_p + \operatorname{ctg} \psi) (\xi q_{\text{сеп}} \operatorname{tg} \varphi_0 (1 + \cos \delta) - 2c) l_c^2 + \\ & + \left[2 \sin \alpha_p (\operatorname{ctg} \alpha_p + \operatorname{ctg} \psi) c h_c - \frac{\sin(\alpha_p + \varphi + \varphi_0 + \psi)}{\cos \varphi \cos \varphi_0} q_{\text{сеп}} b_p \right] \times \\ & \times l_c + \frac{c h_c}{\sin \psi} \left(b_p + \frac{\rho h_c}{2} \operatorname{ctg} \psi \right) = 0. \end{aligned} \quad (2.38)$$

Дійсне рішення рівняння (2.38), що відповідає фізичній суті та реальним параметрам процесу різання, запишеться у такому вигляді:

$$l_c = \frac{-B_* - \sqrt{B_*^2 - 4A_*C_*}}{2A_*}, \quad (2.39)$$

де

$$\begin{cases} A_* = \frac{\sin^2 \alpha_p}{2} (\operatorname{ctg} \alpha_p + \operatorname{ctg} \psi) (\xi q_{\text{сеп}} \operatorname{tg} \varphi_0 (1 + \cos \delta) - 2c); \\ B_* = 2 \sin \alpha_p (\operatorname{ctg} \alpha_p + \operatorname{ctg} \psi) c \cdot h_c - \frac{\sin(\alpha_p + \varphi + \varphi_0 + \psi)}{\cos \varphi \cos \varphi_0} q_{\text{сеп}} b'_p; \\ C_* = \frac{c h_c}{\sin \psi} \left(b'_p + \frac{\rho h_c}{2} \operatorname{ctg} \psi \right) \end{cases} \quad (2.40)$$

b'_p – ширина крайніх бокових різців.

У залежностях (2.40) h_c визначається відповідно (2.19), $h_c = (a' - n' \alpha_p) b'_p k_{\text{пер}}$, $k_{\text{пер}}$ – перехідний коефіцієнт від критичної глибини $h_{\text{кр}}$ до глибини сколювання [36, 77].

Рішення (2.39) може бути використане для визначення довжини лемеша як при блокованому асиметричному різанні у верхньому ярусі, так і при блокованому симетричному різанні з утворенням прорізу з вертикальними стінками у нижньому ярусі. Для визначення довжини лемеша у верхньому ярусі коефіцієнт A^* вираховується за умови $\xi q_{\text{сеп}} \cos \delta = 0$, а $\rho \neq 0$.

У рівності (2.39) є невідомий параметр ψ . Визначимо його на основі припущення, що кожний раз при $h_p = h_{\text{кр}}$ значення кута зсуву ψ встановлюється таким чином, що опір зсуву елемента стружки, а тому й опір різанню, будуть мінімальні [77]. В загальному випадку опір різанню можна визначити через повну довжину лемеша $l_L = l_c / 0,9 - 0,95$

$$P = q_{\text{сеп}} l_L b_p \sin \alpha_p + f q_{\text{сеп}} l_L b_p \cos \alpha_p = q_{\text{сеп}} l_L b_p \sin \alpha_p (1 + f \operatorname{ctg} \alpha_p), \quad (2.41)$$

де f – коефіцієнт зовнішнього тертя ґрунту ($f = \operatorname{tg} \phi$).

Продиференціюємо вираз (2.41) за кутом ψ

$$\frac{dP}{d\psi} = q_{\text{сеп}} b_p \sin \alpha_p (1 + f \operatorname{ctg} \alpha_p) \frac{dl_L}{d\psi} = 0. \quad (2.42)$$

Звідси $dl_L/d\psi = 0$ і $l_L = \min$, тому що при $l_L = \max$ отримаємо $P_{\max}$, а це суперечить умові. Таким чином, значення кута ψ визначається мінімальною довжиною лемеша.

Характерні залежності довжини лемеша від кутів зсуву елементів стружки ґрунтів для різних кутів різання різців наведені на рис. 2.5. Кут зсуву ґрунту інтерполюється лінійною спадною залежністю від кута різання

$$\psi = a_\psi - k_\psi \alpha_p,$$

де a_ψ і k_ψ – коефіцієнти інтерполяції, наведені в табл. 2.2;

α_p – кут різання в градусах.

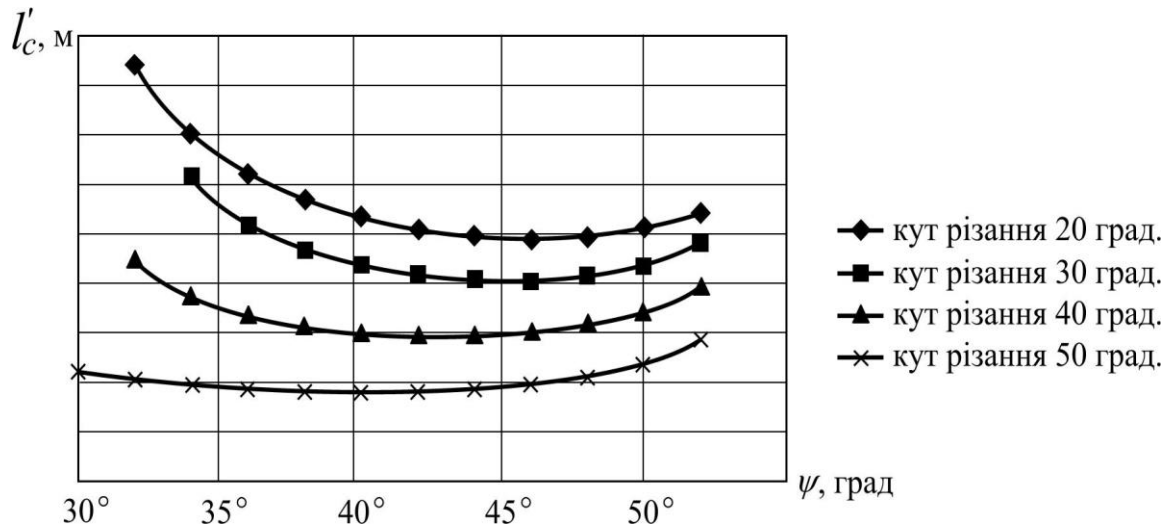


Рисунок 2.5 – Характерні залежності довжини лемеша різців від кута зсуву елементів ґрунтової стружки

Таблиця 2.2. – Значення інтерполюючих коефіцієнтів для визначення кута зсуву ґрунту

Значення коефіцієнтів \ Тип ґрунту	Тип ґрунту		
	Напівтвердий суглинок	Напівтверда глина	Твердий супісок
α_ψ	52,2	55,8	51,0
k_ψ	0,17	0,23	0,20

На рис. 2.6 наведені залежності мінімальної відносної (до ширини лемеша) довжини лемешів різців для блокованого асиметричного різання боковими крайніми різцями. Графічні залежності наведені для напівтвердих суглинка та глини та твердого супіску для кутів різання різця – 20–50°.

За аналогією побудовані графічні залежності за математичною моделлю (2.38) [77] для блокованого різання середніми різцями (рис. 2.7).

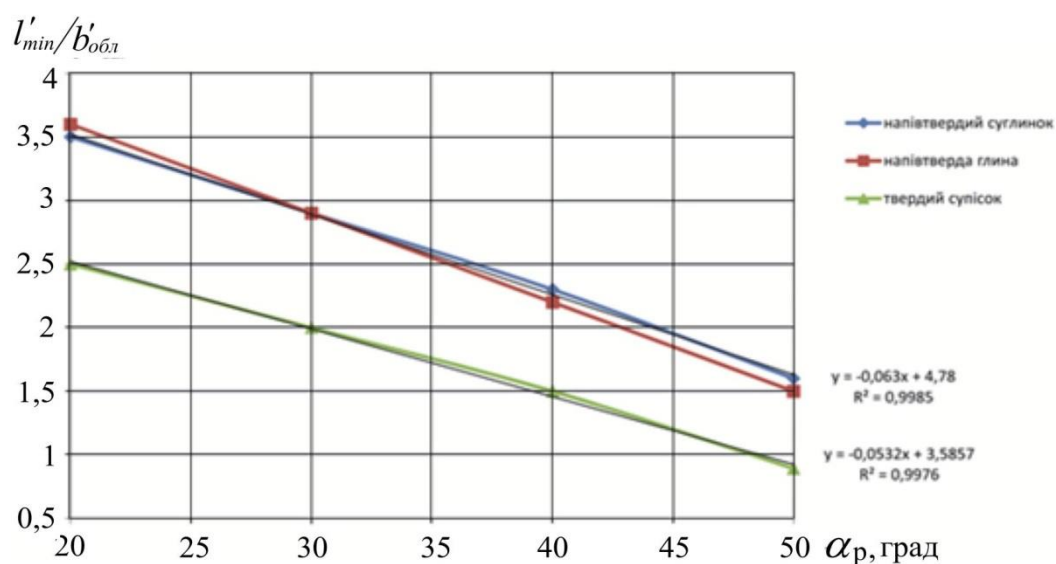


Рисунок 2.6 – Залежність мінімальної відносної довжини лемешів від кута різання різців для блокованого асиметричного різання боковими крайніми різцями

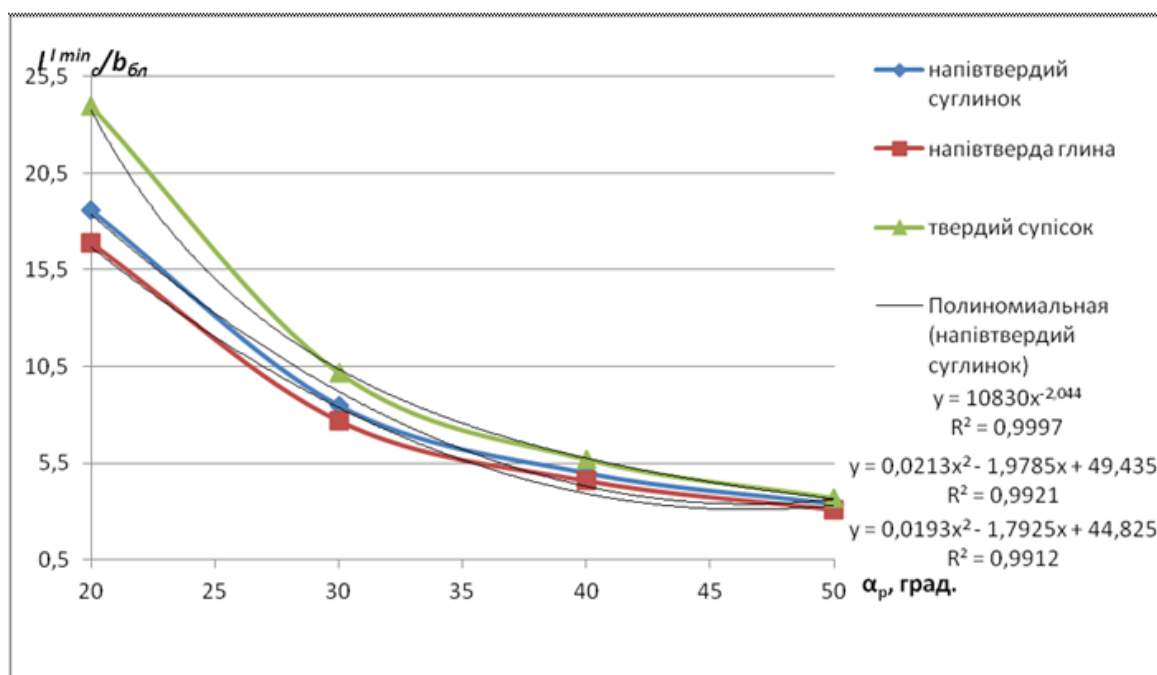


Рисунок 2.7 – Залежність мінімальної відносної довжини лемешів від кута різання різців для блокованого різання середніми різцями

Аналіз залежностей дозволив установити, що відносна довжина лемеша залежить від схеми та кута різання різців і фізико-механічних властивостей ґрунтів. Так, зі зміною кута різання різців від 20° до 50° відносна довжина лемешів зменшується для схеми блокованого асиметричного різання боковими крайніми різцями від 3,52 до 1,63 для напівтвердих суглинка та глини та від 2,52 до 0,93 для твердого супіску. Для схеми блокованого різання середніми різцями зі збільшенням кута різання від 30° до 50° відносна довжина лемешів зменшується: для напівтвердого суглинка від 8,5 до 3,4; для твердого супіску від 10,2 до 3,7; для напівтвердої глини від 7,7 до 3,2.

Аналitичні залежності апроксимуються з достатньою для практичних розрахунків точністю (для бокових крайніх різців – до 2,0 %, а для середніх – до 7,0 %) залежностями, що наведені на рис. 2.6 і 2.7, якщо кут різання в градусах. Якщо кут різання підставляти в радіанах отримаємо такі залежності:

– для схеми блокованого асиметричного різання боковими крайніми різцями (α_p в рад)

$$\frac{l'_{\min}}{b'_{\text{а\text{бл.}}} = 4,78 - 3,61\alpha_p \text{ (напівтверді суглинок і глина);} \quad (2.43)$$

$$\frac{l'_{\min}}{b'_{\text{а\text{бл.}}} = 3,586 - 3,05\alpha_p \text{ (твердий супісок);} \quad (2.44)$$

– для схеми блокованого різання середніми різцями

$$\frac{l'_{\min}}{b'_{\text{н\text{бл.}}} = 63,37\alpha_p^2 - 102,71\alpha_p + 44,825 \text{ (напівтверда глина);} \quad (2.45)$$

$$\frac{l'_{\min}}{b'_{\text{н\text{бл.}}} = 69,93\alpha_p^2 - 113,37\alpha_p + 49,435 \text{ (напівтвердий суглинок);} \quad (2.46)$$

$$\frac{l'_{\min}}{b'_{\text{нбл.}}} = \frac{2,76}{\alpha_p^{2,044}} \text{ (твердий супісок).} \quad (2.47)$$

Спадні залежності на рис. 2.6, 2.7 можна пояснити наступним чином. Із збільшенням кута різання різця відповідно рівності (2.19) зменшується критична глибина різання, а отже, й довжина лемеша. Якщо збільшується ширина лемеша, то і прямо пропорційно збільшується критична глибина різання різця і відповідно довжина лемеша.

Таким чином, отримані прості залежності для визначення довжини лемеша на критичній глибині різання різців, що дає можливість визначити їх опір різанню за залежністю (2.41).

Встановлено, що відносна довжина лемешів бокових крайніх різців на критичній глибині різання ґрунту описується лінійними спадними залежностями від їх кута різання, а відносна довжина лемешів середніх різців, що здійснюють блоковане симетричне різання на критичній глибині, описується квадратно-параболічними спадними функціями для напівтвердих суглинку та глини та степеневою залежністю для твердого супіску.

2.4. Визначення числа ліній різання та висоти ґрунтотранспортувальних скребків

З першого розділу відомо, що є дві методики визначення режимів роботи і параметрів багатоскребкових ланцюгових траншейних екскаваторів. Перша методика націлена на визначення конструктивних параметрів різців на основі параметрів траншеї та заданої потужності двигуна базової машини [35]. Друга націлена, навпаки, на визначення необхідної потужності двигуна базової машини на основі розмірів траншеї, питомого опору копанню ґрунту та технічної продуктивності [26]. У них кількість ліній різання вибирається конструктивно залежно від ширини траншеї, а висота скребка в межах 0,1–0,15 м.

Таким чином, існує проблема визначення параметрів ланцюгово-скребкових робочих органів, що працюють на основі критичноглибинного

різання ґрунтів залежно від їх фізико-механічних властивостей і геометричних параметрів різців з метою забезпечення мінімальної енергоємності робочого процесу та максимальної продуктивності машини.

Для досягнення поставленої мети необхідно в першу чергу визначити число ліній різання та висоту ґрунтотранспортувальних скребків залежно від ширини траншеї.

Вихідними даними для розрахунку є:

- ширина різців $b_{\text{бл.}}$;
- їх кут різання α_p ;
- максимальна глибина траншеї H ;
- ширина траншеї B ;
- фізико-механічні характеристики ґрунтів (коефіцієнт зчеплення c ; питома сила тяжіння $\gamma_{\text{гр}}$; кути внутрішнього φ_0 і зовнішнього тертя φ).

Логічне обґрунтування та визначення параметрів проводиться в наступній послідовності [96].

Із умови міцності різців на згин при зустрічі різця з перешкодою вибирається мінімальна ширина різців. В подальшому визначаються наступні параметри (рис. 2.8).

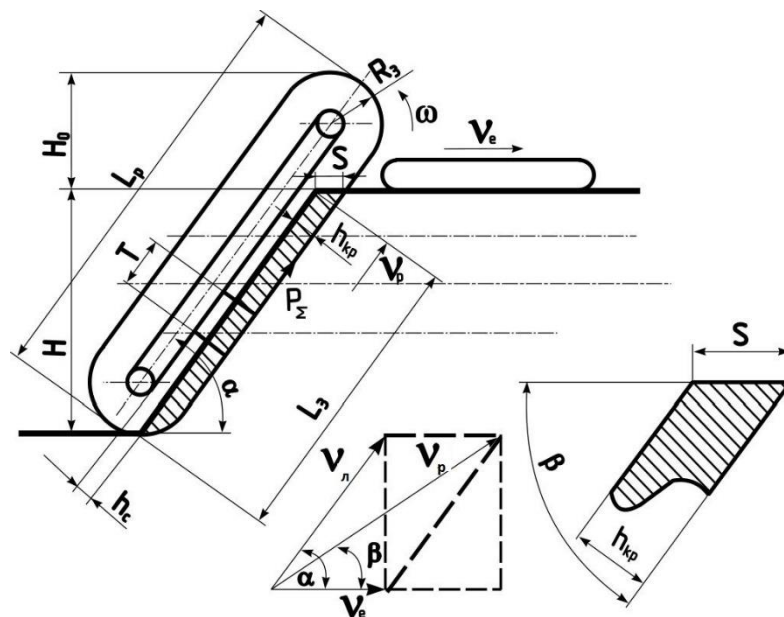


Рисунок 2.8 – Розрахункова схема взаємодії робочого органа з ґрунтом

Критична глибина різання

$$h_{\text{кр}} = \frac{a \cdot b_{\text{бл}}}{(\text{tg} \alpha_p)^n \cdot k_{\text{бок}}}, \quad (2.48)$$

де a і n – коефіцієнти, які залежать від фізико-механічних властивостей ґрунту (типу ґрунту), визначені аналітичним способом залежно від загальновідомих вихідних даних ґрунтів і наведені в літературі [26, 37, 77, 78, 80];

α_p – кут різання, за якого енергоємність мінімальна ($\alpha_p = 25\text{--}35^\circ$) [81];

$k_{\text{бок}}$ – відношення глибини сколювання ґрунту до критичної глибини різання в момент утворення елемента стружки ($k_{\text{бок}} = 0,9\text{--}0,95$) [77].

Кут нахилу бокових розширень прорізу до горизонту (при блокованому різанні) [81]

$$\gamma = \arccos \left[\frac{c \cdot \cos \varphi_0}{\left(1 - 0,74 \text{tg} \varphi_0 - \frac{1,52 \cdot c}{q_{\text{кр}}} \right) q_{\text{сер}}} \right] - \varphi_0, \text{ град} \quad (2.49)$$

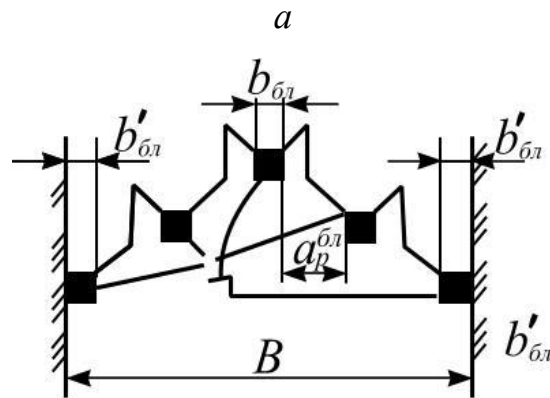
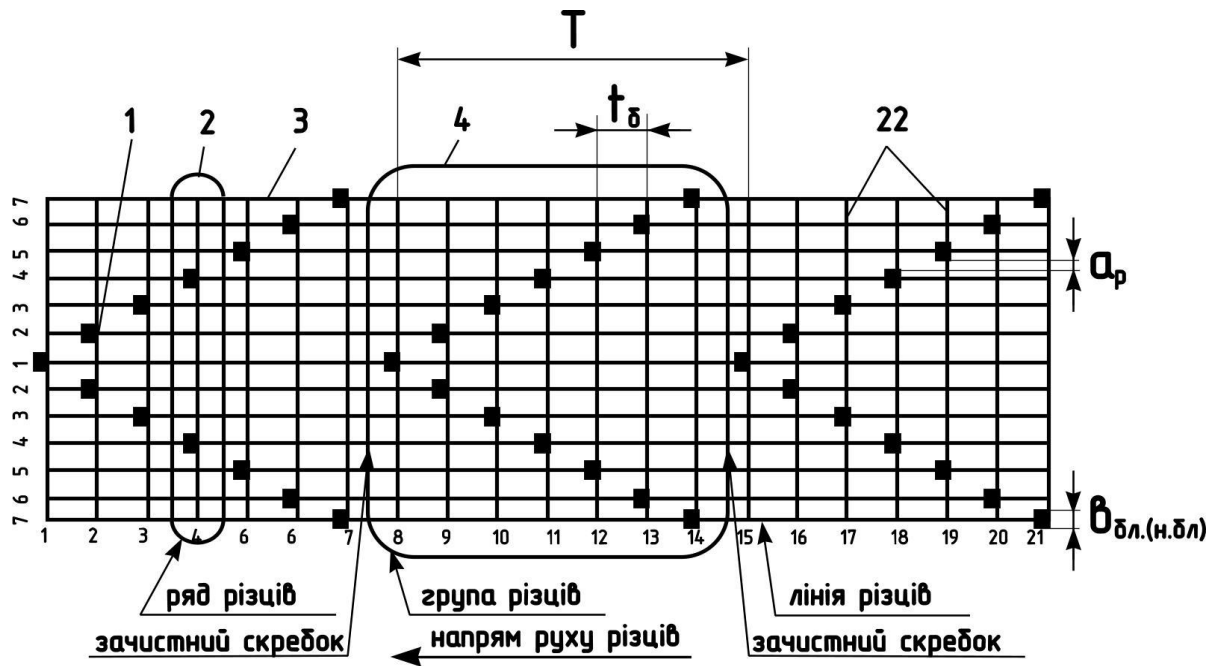
де c – коефіцієнт зчеплення;

φ_0 – кут внутрішнього тертя ґрунту;

$q_{\text{кр}}$, $q_{\text{сер}}$ – критичне та середнє значення тиску на ґрунторозробний орган визначаються відповідно [77].

Відстань між суміжними ґрунторозробними органами (різцями) дорівнює (рис. 2.9, 2.11):

$$a_p^{\text{бл}} = 2 \cdot h_{\text{кр}} \cdot k_{\text{бок}} \cdot \text{ctg} \gamma, \quad (2.50)$$



а – схема кріплення різців на робочому органі;

б – схема установки ножів на одній секції;

1 – різець; 2 – ряд різців; 3 – лінія різців; 4 – група різців;

1–21 – номери різців; 22 – скребки (балки)

Рисунок 2.9 – Ступенева (блокована) схема розставлення різців:

Критичні глибини різання та відстані між суміжними різцями для напівтвердого суглинку наведені в додатку А, табл. А.1.

Число ліній різання визначається з умови, що зовнішні грані крайніх бокових різців взаємодіють з вертикальними стінками траншеї (див. рис. 2.9, б)

$$B = 2b'_{\text{бл.}} + (i_{\text{л.}}^{\text{бл.}} - 2)b_{\text{бл.}} + (i_{\text{л.}}^{\text{бл.}} - 1)\alpha_p^{\text{бл.}} \quad (2.51)$$

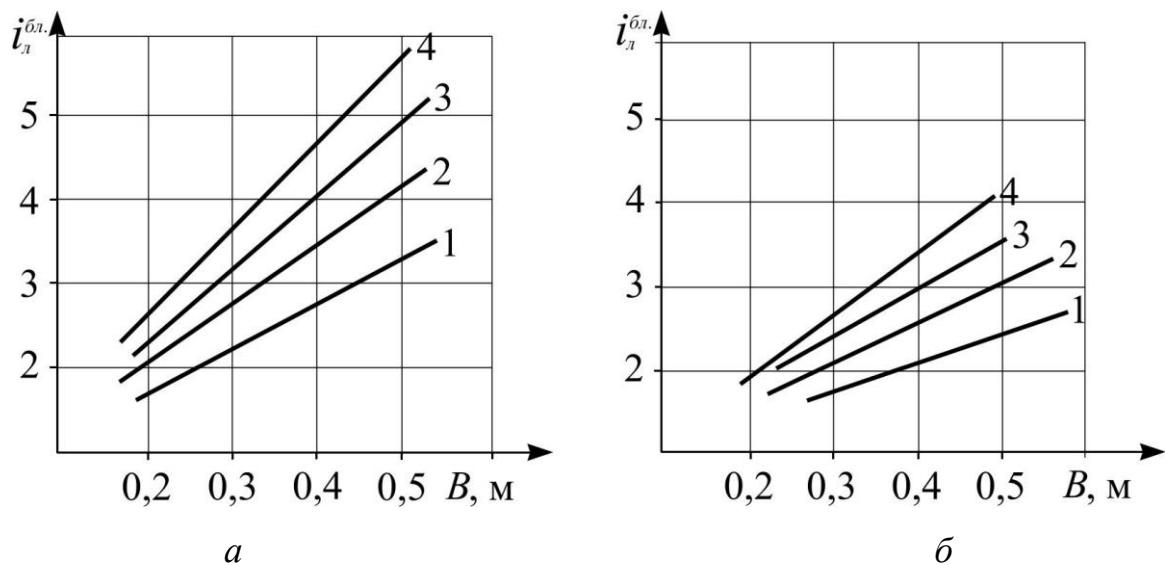
звідки

$$i_{\text{л.}}^{\text{бл.}} = \frac{B - 2(b'_{\text{бл.}} - b_{\text{бл.}}) + \alpha_p^{\text{бл.}}}{b_{\text{бл.}} + \alpha_p^{\text{бл.}}}, \quad (2.52)$$

де b'_p – ширина крайніх бокових різців

Число ліній різання необхідно округлити до найближчого цілого числа та уточнити ширину траншеї за залежністю (2.51) (додаток А, табл. А.2).

Залежності числа ліній різання від ширини траншеї для напівтвердого суглинка наведені на рис. 2.10.



а – $b_{\text{бл.}} = 0,02$ м; б – $b_{\text{бл.}} = 0,03$ м;

1 – $\alpha_p = 20^\circ$; 2 – $\alpha_p = 30^\circ$; 3 – $\alpha_p = 40^\circ$; 4 – $\alpha_p = 50^\circ$

Рисунок 2.10 – Залежність числа ліній різання від ширини траншеї (напівтвердий суглинок)

Якщо в ряду встановлено по 2 різці, то кількість їх рядів (балок) дорівнює

$$Z_6 = 1 + \frac{i_{\text{л}} - 1}{2} = \frac{i_{\text{л}} + 1}{2}, \quad (2.53)$$

Z_6 необхідно округлити до цілого числа.

Якщо на балці встановлено по одному різцю, $Z_6 = i_{\text{л}}$.

Різання ґрунту на критичній глибині можливе за умови, якщо

$$S_1 = \frac{h_{\text{кр}}}{\sin \beta} = \frac{v_e t_p}{Z_{\text{гр}}^3}; \quad t_p = \frac{H}{\sin \beta \cdot v_p}; \quad T = \frac{H}{\sin \beta \cdot Z_{\text{гр}}^3} \quad (2.54)$$

маємо з одного боку

$$\frac{v_e}{v_p} = \frac{h_{\text{кр}} Z_{\text{гр}}^3}{H} \quad (2.55)$$

з іншого боку

$$\frac{v_e}{v_p} = \frac{S_1}{T} \quad (2.56)$$

де S_1 – подача на один різець $\left(\frac{v_e \cdot t_p}{Z_{\text{гр}}^3} \right)$;

T – крок установлення однойменних різців у сусідніх групах ґрунторозробних органів (див. рис. 2.9);

v_e – робоча швидкість екскаватора;

v_p – відносна швидкість скребкового ланцюга (швидкість різання);

t_p – час різання різця;

$Z_{\text{гр}}^3$ – кількість груп різців, що одночасно знаходяться в забої;

β – кут нахилу траєкторії руху різців до горизонту [2, 26].

При кроці розставлення різців відповідно (2.54) будуть діяти мінімальні динамічні навантаження на приводні ланцюги, оскільки різання буде здійснюватися постійним числом різців.

Крок встановлення балок (див. рис. 2.9)

$$t_{\delta} = \frac{T}{Z_{\delta}} = \frac{H}{Z_{\delta} \sin \beta \cdot Z_{\text{гр}}^3} \quad (2.57)$$

Кількість груп різців, що одночасно знаходяться в забої, якщо $T = \frac{H}{\sin \beta}$

$$Z_{\text{гр}}^3 = \frac{l_3}{T} = \frac{H / \sin \beta}{H / \sin \beta} = 1 \text{ шт.} \quad (2.58)$$

Висота скребків (балок) h_c , які оснащені різцями, визначаються з умови, що на балці встановлено по 2 різці, і зруйнований ними ґрунт (з урахуванням його розпушення) заповнює міжскребковий об'єм між двома суміжними транспортувальними скребками, що встановлені з кроком t_{δ} на довжині забою $\frac{H}{\sin \beta}$ (див. рис. 2.9). Тому

$$h_c \frac{BT}{Z_{\delta}^{\text{бл}}} \geq F_{\text{бл}} \cdot \frac{H}{\sin \beta} = 2h_{\text{кр}} (b_{\text{бл.}} + h_{\text{кр}} k_{\text{бок}}^2 \text{ctg} \gamma) k_p \frac{H}{\sin \beta}, \quad (2.59)$$

де k_p – коефіцієнт розпушення ґрунту;

$F_{\text{бл}}$ – площі поперечного перерізу зруйнованого ґрунту при блокованому різанні (рис. 2.11).

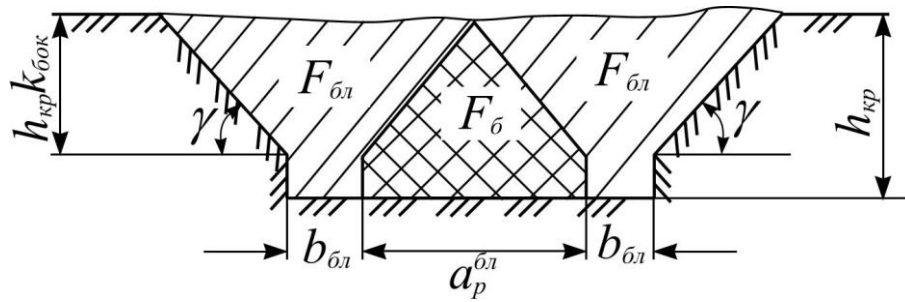


Рисунок 2.11 – Форма поперечного перерізу зруйнованого ґрунту з двома різцями на балці при блокованому різанні

У зв'язку з тим, що $T = \frac{H}{Z_{\text{гр}}^3 \cdot \sin \beta}$ (див. (2.54), маємо для блокованого різання, якщо $\alpha_p^{\text{бл.}}$ визначається за залежністю (2.50)

$$h_c^{\text{бл.}} \geq \frac{2h_{\text{кр}} Z_{\delta}^{\text{бл.}} \cdot Z_{\text{гр}}^3}{B} (b_{\text{бл.}} + h_{\text{кр}} k_{\text{пер}}^2 \text{ctg} \gamma) k_p, \text{ м.} \quad (2.60)$$

Якщо на балках-скребках встановлено по одному різцю, у чисельнику залежності (2.60) відсутній множник «2».

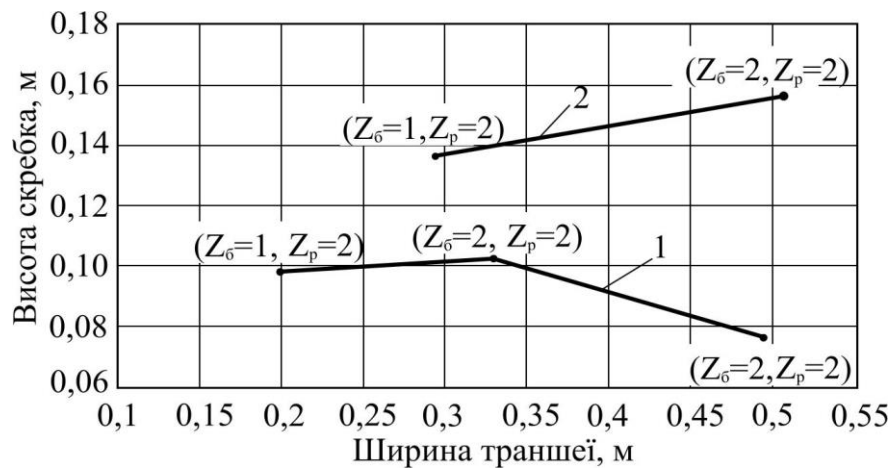
Висота скребок (без різців) для зачищення грантових виступів площею F_b (див. рис. 2.11) дорівнює

$$h_{\text{зс}} = h_c + h_{\text{кр}}, \text{ м.} \quad (2.61)$$

Залежності висоти скребок від ширини траншеї для напівтвердого суглинку наведені на рис. 2.12 і в додатку А, табл. А.3.

Якщо в забої одночасно знаходиться дві групи різців ($Z_{\text{гр}}^3 = 2$), то крок між скребками t_6 та міжскребковий простір у два рази зменшуються. Тому, щоб висота балок була незмінною та відповідала продуктивності робочого

органа за виносною здатністю, на кожній із них повинно бути встановлено по одному різцю замість двох.



1 – для $b_{\text{бл}} = 0,02$ м; 2 – для $b_{\text{бл}} = 0,03$ м

Рисунок 2.12 – Залежність висоти скребків від ширини траншеї

$$(\alpha_p = 30^\circ, Z_{\text{гр}}^3 = 1)$$

Створена методика дозволяє визначити кількість ліній різання та висоту транспортувальних скребків з різцями, що здійснюють критичноглибинне блоковане різання, з метою зниження енергоємності руйнування, підвищення продуктивності робочого процесу ланцюгово-скребкових траншейних екскаваторів.

2.5. Обґрунтування критичноглибинних режимів роботи та визначення продуктивності багатоскребкових траншейних екскаваторів

Відомі методики розрахунку параметрів багатоскребкових траншейних екскаваторів не гарантують, що здійснення робочого процесу буде відбуватися на критичній глибині різання із споживанням мінімальної питомої енергії та максимальною продуктивністю. Це стане можливим, якщо всі різці незалежно

від ґрунтових умов, типу різання та їх розташування будуть руйнувати ґрунт на критичну глибину. Щоб забезпечити стабільну товщину стружки, що дорівнює критичній глибині різання за умови зміни робочої швидкості подачі, необхідно пропорційно змінювати швидкість різання, забезпечуючи стабільність відношення цих швидкостей [34].

Актуальним завданням є визначення абсолютних значень цих швидкостей залежно від фізико-механічних властивостей ґрунтів, геометричних параметрів різців та умов їх розвантаження.

Швидкість різання ϑ_p залежить від кутової швидкості та радіуса приводної зірочки. Кутову швидкість ω обґрунтовано в роботі [97] на основі визначення часу розвантаження t_{pv} та кута розвантаження φ_{pv} залежно від висоти скребка h_c та кутів зовнішнього тертя ґрунту μ_1 за умови, що $\varphi_{pv} = \omega t_{pv} = \frac{\pi}{2}$. Чим більша висота скребка при заданій кутовій швидкості, тим більший час розвантаження.

За деякої висоти скребка ґрунт на куті повороту зірочки $\frac{\pi}{2}$ рад. не встигає розвантажитися, пересипається назад у траншею, що призводить до зменшення продуктивності та збільшення енергоємності робочого процесу. Тому для заданої висоти скребка та типу ґрунту необхідно визначити таку кутову швидкість зірочки, щоб ґрунт встигав гравітаційно розвантажитися за час, поки ведуча зірочка повернеться на кут $\frac{\pi}{2}$ рад. Умова розвантаження корегується кутовою швидкістю ω . У зв'язку з тим, що час розвантаження ґрунту суттєво залежить від висоти скребка та практично не залежить від кутової швидкості в межах її зміни від 5,0 до 9,0 с⁻¹, максимальну кутову швидкість можна визначити за такою залежністю

$$\omega_{\max} = \frac{\pi}{2t_{pv}}. \quad (2.62)$$

У роботі [97] отримана складна аналітична залежність для визначення часу розвантаження від висоти скребка. З метою її спрощення проведена апроксимація в межах кутової швидкості $\omega = 5,0\text{--}9,0 \text{ с}^{-1}$ (помилка апроксимації не перевищує 6,2 %) степеневою залежністю [98]

$$h_c = a_f t_{\text{рв}}^{n_f}, \quad (2.63)$$

де a_f і n_f – коефіцієнти апроксимації, що залежать від коефіцієнта зовнішнього тертя ґрунту (табл. 2.3).

Таблиця 2.3 – Значення коефіцієнтів апроксимації

f	0,2	0,3	0,4
a_f	5,07...5,45	3,69...4,42	2,60...3,65
n_f	1,96...2,02	1,91...1,96	1,81...1,91

Звідки визначається час розвантаження

$$t_{\text{рв}} = n_f \sqrt{\frac{h_c}{a_f}}. \quad (2.64)$$

Тоді швидкість ланцюга буде дорівнювати

$$\vartheta_{\text{л}} = \frac{\pi \cdot t_{\text{ланц}}}{4 \cdot n_f \sqrt{\frac{h_c}{a_f}} \cdot \sin \frac{180^\circ}{n_z}}, \quad (2.65)$$

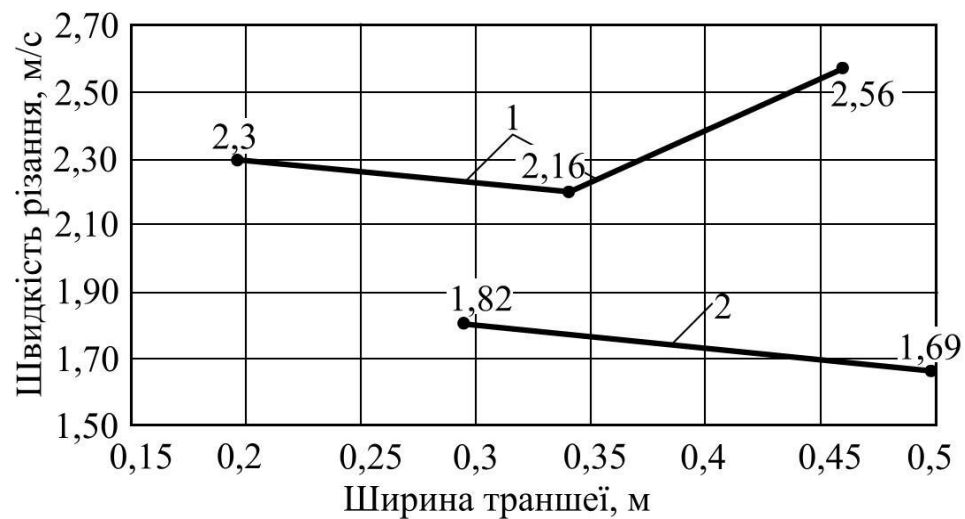
де $t_{\text{ланц}}$ – крок з'єднання ланок ланцюга;

n_z – число зубів приводної зірочки.

Швидкість різання (див. рис. 2.8) дорівнює

$$\vartheta_p = \sqrt{\vartheta_{\text{л}}^2 + \vartheta_e^2 + 2\vartheta_e \vartheta_{\text{л}} \cdot \cos \alpha}. \quad (2.65a)$$

Залежність швидкості блокованого різання від ширини траншеї, наприклад, для напівтвердого суглинка наведена на рис. 2.13 і додатку А, табл. А.4.



1 – для ширини середніх різців $b_{\text{бл}} = 0,02$ м з кутом різання 30° ;

2 – для ширини середніх різців $b_{\text{бл}} = 0,03$ м з кутом різання 30°

Рисунок 2.13 – Залежність швидкості блокованого різання в напівтвердому суглинку від ширини траншеї:

Технічна продуктивність екскаватора ($\text{м}^3/\text{год}$) визначається виносною здатністю однієї групи різців, що знаходяться в забої ($Z_{\text{гр}}^3 = 1$)

$$\Pi'_{\text{техн}} \leq 3600 B h_c \vartheta_p \frac{k_{\text{н}}}{k_p} \Delta_p, \quad (2.66)$$

де B – ширина траншеї;

h_c – висота скребків;

k_n – коефіцієнт заповнення міжскребкового екскаваційного простору;

Δ_p – коефіцієнт розтрушування.

Якщо в забої знаходиться $Z_{гр}^3$ груп різців, то

$$\Pi_{техн.} \leq \Pi'_{техн.} Z_{гр}^3. \quad (2.67)$$

Залежність технічної продуктивності багатоскребкового траншейного екскаватора від ширини траншеї в напівтвердому суглинку наведена на рис. 2.14 ($Z_{гр}^3 = 1$) і додатку А, табл. А.5.



1 – для ширини середніх різців $b_{бл.} = 0,02$ м з кутом різання $\alpha_p = 30^\circ$;

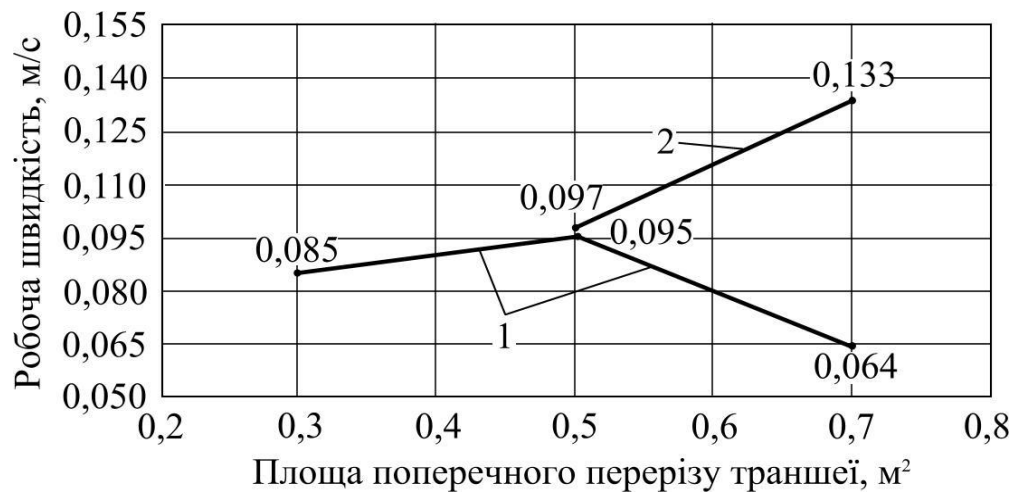
2 – для ширини середніх різців $b_{бл.} = 0,03$ м з кутом різання $\alpha_p = 30^\circ$

Рисунок 2.14 – Залежність технічної продуктивності багатоскребкового траншейного екскаватора від ширини траншеї ($Z_{гр}^3 = 1$)

Робоча швидкість екскаватора (м/с) залежить від технічної продуктивності та площі поперечного перерізу траншеї

$$v_{e1} = \frac{\Pi'_{техн.}}{3600BH}. \quad (2.68)$$

Залежність робочої швидкості від площі поперечного перерізу траншеї ($B \times H$) у напівтвердому суглинку наведена на рис. 2.15 і додатку А, табл. А.6.



1 – для ширини середніх різців $b_{\text{бл.}} = 0,02 \text{ м}$ ($\alpha_p = 30^\circ$);

2 – для ширини середніх різців $b_{\text{бл.}} = 0,03 \text{ м}$ ($\alpha_p = 30^\circ$)

Рисунок 2.15 – Залежність робочої швидкості екскаватора від площі (ширини) поперечного перерізу траншеї ($Z_{\text{гр}}^3 = 1$):

Розроблена в п. 2.5 методика дозволяє визначити критичноглибинні режими роботи та максимальну технічну продуктивність багатоскребкових траншейних екскаваторів при мінімальній енергоємності робочого процесу.

2.6. Визначення зусиль і енергоємності блокованого критичноглибинного різання ґрунту різцями багатоскребкових траншеєкопачів

Визначимо зусилля різання різцями на основі знання, визначеного у п. 2.3 довжини лемеша. Сила блокованого різання одним різцем дорівнює

$$P_{1\text{бл.}} = q_{\text{сер}} \cdot l_{\text{бл}} \cdot b_{\text{бл}} \cdot \sin \alpha_p (1 + f \cdot \text{ctg} \alpha_p), \quad (2.69)$$

де $q_{\text{сер}}$ – середній тиск ґрунту на леміш різця;

$b_{\text{бл}}, l_{\text{бл}}$ – відповідно ширина та довжина лемеша;

α_p – кут різання лемеша.

Дослідженнями [35; 81, с. 82] встановлено, що найменші значення енергоємності блокованого різання знаходяться в межах кута різання $\alpha_p = 20\text{--}30^\circ$. Тому для подальших досліджень вибраний кут різання різців $\alpha_p = 30^\circ$.

Число різців, що одночасно розробляють ґрунт в умовах блокованого різання, якщо в забої знаходиться одна група різців ($Z_{\text{гр}}^3 = 1$), дорівнює $Z_p = i_{\text{л}}^{\text{бл}}$. Тоді сумарна сила блокованого різання всіма різцями визначиться таким чином

$$\begin{aligned} P_{\sum P} &= (i_{\text{л}}^{\text{бл}} - 2)P_{\text{бл}} + 2P'_{\text{бл}} + P_{\sum \epsilon} = \\ &= \left[(i_{\text{л}}^{\text{бл}} - 2)l_{\text{бл}} \cdot b_{\text{бл}} + 2l'_{\text{абл}} \cdot b'_{\text{бл}} \right] q_{\text{сер}} \sin \alpha_p (1 + f \operatorname{ctg} \alpha_p) + P_{\sum \epsilon}, \end{aligned} \quad (2.70)$$

де $P'_{\text{бл}}$ – сила асиметричного блокованого різання крайнім боковим різцем;

$b'_{\text{бл}}, l'_{\text{бл}}$ – відповідно ширина та довжина лемеша крайніх бокових різців;

$P_{\sum \epsilon}$ – сумарна сила вільного різання ґрунту, який залишився незруйнованим у фронтальному поперечному перерізі між різцями у вигляді трикутників з основою α_p і висотою $h_{\text{кр}}$ [81]

$$\begin{aligned} P_{\sum \epsilon} &= \left[-(\sin \psi_{\epsilon} + \operatorname{tg} \varphi_0 \cdot \cos \psi_{\epsilon}) \frac{\cos(\alpha_p + \varphi + \psi_{\epsilon})}{\cos \varphi \cdot \sin \alpha_p} q_0 + c \cdot \operatorname{ctg} \psi_{\epsilon} \right] \times \\ &\times h_{\text{кр}}^2 \cdot (i_{\text{л}}^{\text{бл}} - 1) \end{aligned} \quad (2.71)$$

ψ_{ϵ} – кут зсуву ґрунту у фронтальній (повздовжній) площині при вільному різанні ґрунту

$$\psi_{\epsilon} = 90^{\circ} - \frac{\alpha_p + \varphi + \varphi_0}{2}. \quad (2.72)$$

Мінімальний нормальний тиск ґрунту на скребок q_0 під час контакту з незруйнованими ґрунтовими виступами трикутної форми, що залишилися між різцями, дорівнює [100]

$$q_0 = c \cdot (A_1 - 1) \operatorname{ctg} \varphi_0, \quad (2.73)$$

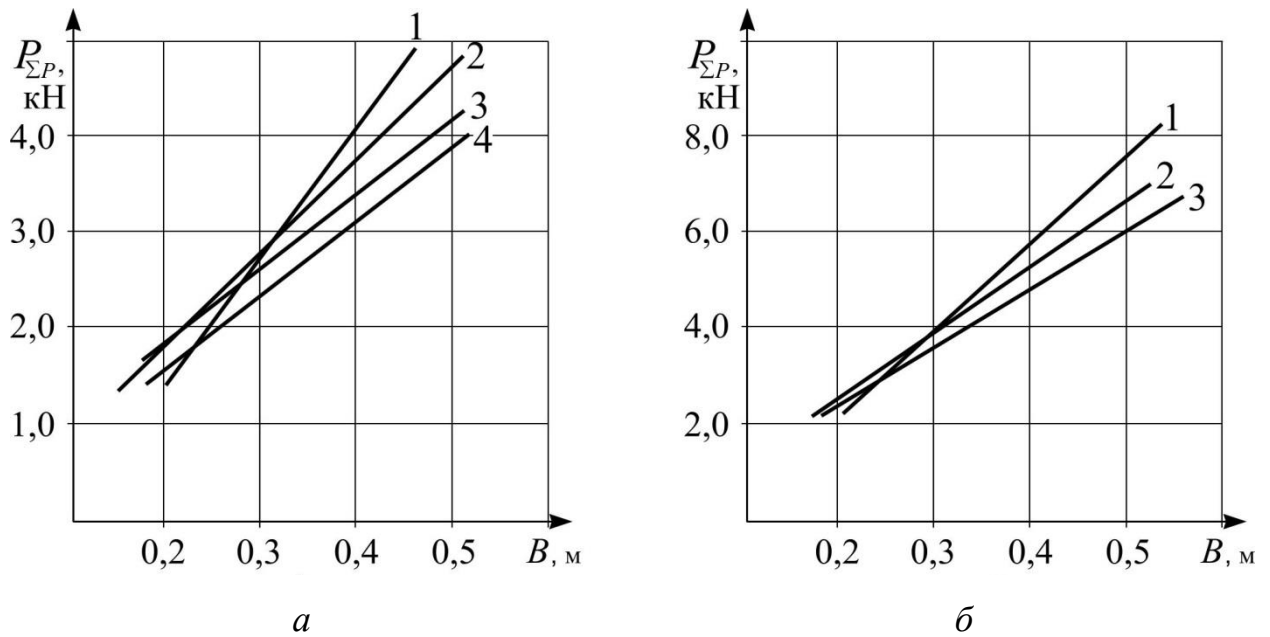
де A_1 – коефіцієнт, що залежить від кута різання різця та кута внутрішнього тертя ґрунту, чисельні значення якого наведені в літературі [100].

Точні значення довжини лемешів відповідно до отриманого рішення (2.39) та відомого рішення (2.138) [77, с. 44] наведені в табл. 2.4.

Таблиця 2.4 – Точні значення довжини лемешів у напівтвердому суглинку

Тип різання	Кут, різання $b_{\text{бл}}, \text{м}$	20°	30°	40°	50°
	$\alpha_p, \text{град}$				
Симетричне блоковане	0,02	0,372	0,170	0,100	0,067
	0,03	0,568	0,274	0,162	0,108
Асиметричне блоковане	0,02	0,07	0,059	0,045	0,031
	0,03	0,104	0,088	0,068	0,047

Значення сумарної сили блокованого та вільного різання напівтвердого суглинку різцями залежно від кутів різання та ширини траншеї наведені в додатку А, табл. А.7, А.8, а сумарної сили різання для однієї групи різців на рис. 2.16 і в додатку А, табл. А.9.



1 – $\alpha_p = 20^\circ$ ($b'_{\text{абл}} = 0,041 \text{ м}$); 2 – $\alpha_p = 30^\circ$ ($b'_{\text{абл}} = 0,035 \text{ м}$);

3 – $\alpha_p = 40^\circ$ ($b'_{\text{абл}} = 0,033 \text{ м}$); 4 – $\alpha_p = 50^\circ$ ($b'_{\text{абл}} = 0,033 \text{ м}$)

Рисунок 2.16 – Залежність сумарної сили критичноглибинного різання різцями від ширини траншеї (грунт – напівтвердий суглинок):

а – для $b_{\text{бл}} = 0,02 \text{ м}$; б – для $b_{\text{бл}} = 0,03 \text{ м}$:

Сила опору транспортування зрізаного ґрунту по поверхні забою дорівнює [34]

$$P_{\text{тр}} = \frac{Bh_{\text{кр}} \cdot H\gamma_{\text{гр}}}{k_p \sin \beta} (1 + \operatorname{tg} \varphi_0 \cdot \operatorname{ctg} \alpha) \quad (2.74)$$

Сила натягу ланцюга, що необхідна на підйом ґрунту із забою, дорівнює силі тяжіння цього ґрунту

$$P_{\text{під}} = Bh_c \gamma_{\text{гр}} \left(\frac{H}{2} + H_0 \right) \cdot \frac{k_{\text{н}}}{\sin \alpha \cdot k_p} \quad (2.75)$$

Тоді сумарне зусилля в ланцюгу, якщо в забої знаходиться $Z_{\text{гр}}^3$ різців, дорівнює

$$P_{\Sigma} = (P_{\Sigma P} + P_{\text{тр}} + P_{\text{під}}) Z_{\text{гр}}^3. \quad (2.76)$$

Енергоємність руйнування одного кубічного метра ґрунту чисельно дорівнює питомому опору копанню

$$E_{\text{м}^3} = \frac{P_{\Sigma} \cdot 1 \text{ м}}{B \cdot h_{\text{кр}} \cdot 1 \text{ м}}. \quad (2.77)$$

Необхідна потужність двигуна на привід ланцюгово-скребкового робочого органа

$$N_{\text{р.о}} = \frac{(P_{\Sigma P} + P_{\text{тр}} + P_{\text{під}}) Z_{\text{гр}}^3 \vartheta_p}{\eta_{\text{пр}} \cdot \eta_{\text{ланц}}}, \quad (2.78)$$

де $\eta_{\text{пр}}$, $\eta_{\text{ланц}}$ – відповідно коефіцієнти корисної дії привода та ланцюга [2, 26].

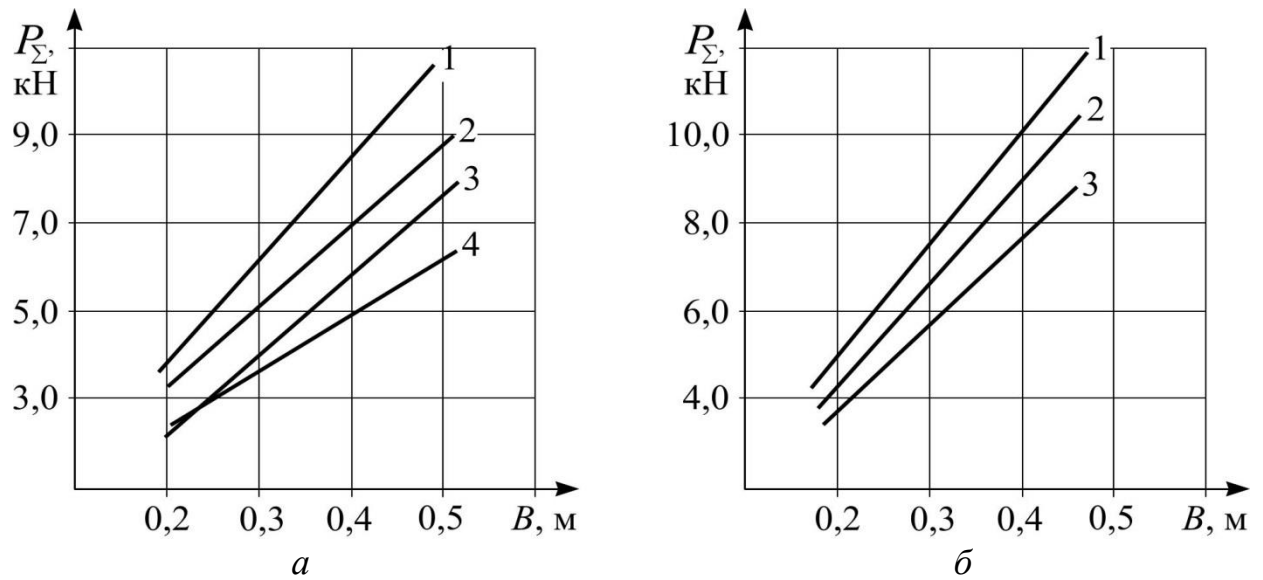
Якщо задана потужність двигуна $N_{\text{дв}}$ базової машини, то можна визначити $Z_{\text{гр}}^3$ із балансу потужності

$$\frac{(P_{\Sigma P} + P_{\text{тр}} + P_{\text{під}}) Z_{\text{гр}}^3 \cdot \vartheta_p + N_{\text{шн}}}{\eta_{\text{пр}} \cdot \eta_{\text{ланц}}} + N_{\text{пер}} = N_{\text{дв}}; \quad (2.79)$$

$$Z_{\text{гр}}^3 = \frac{(N_{\text{дв}} - N_{\text{пер}}) \eta_{\text{пр}} \cdot \eta_{\text{ланц}} - N_{\text{шн}}}{(P_{\Sigma P} + P_{\text{тр}} + P_{\text{під}}) \cdot \vartheta_p} \quad (2.80)$$

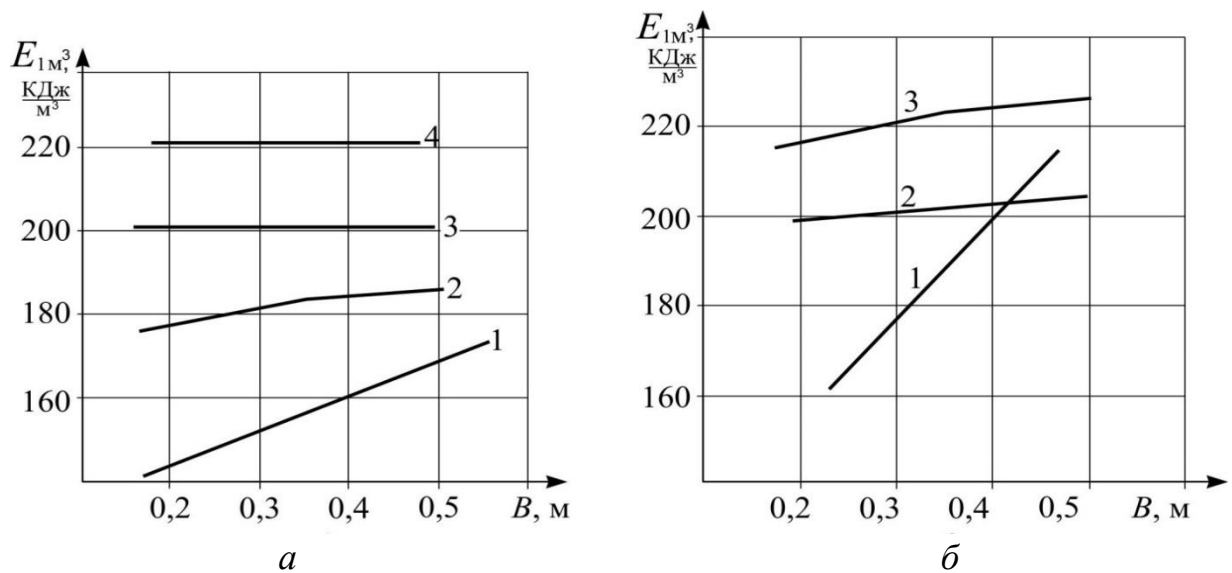
де $N_{\text{шн}}$, $N_{\text{пер}}$ – потужності на привод транспортувальних шнеків і переміщення машини визначаються відповідно до літератури [2, 26, 34, 37].

На рис. 2.17. і 2.18 та в додатку А, табл. А.10, А.11 наведені залежності сумарного зусилля натягу ланцюга та енергоємності розроблення 1 м³ ґрунту від ширини траншеї та кута різання різців.



a – для $b_{\text{бл}} = 0,02$ м; $б$ – для $b_{\text{бл}} = 0,03$ м:
 1 – $\alpha_p = 20^\circ$; 2 – $\alpha_p = 30^\circ$; 3 – $\alpha_p = 40^\circ$; 4 – $\alpha_p = 50^\circ$

Рисунок 2.17 – Залежність сумарної сили копання від ширини траншеї (грунт – напівтвердий суглинок)



a – для $b_{\text{бл}} = 0,02$ м; $б$ – для $b_{\text{бл}} = 0,03$ м: 1 – $\alpha_p = 20^\circ$; 2 – $\alpha_p = 30^\circ$;
 3 – $\alpha_p = 40^\circ$; 4 – $\alpha_p = 50^\circ$

Рисунок 2.18 – Залежність енергоємності розробки одного кубічного метра ґрунту від ширини траншеї (грунт – напівтвердий суглинок)

Аналіз розрахункових даних показав, що сумарна сила критичноглибинного різання прямо пропорційно зростає зі збільшенням ширини траншеї для всіх кутів різання в межах $\alpha_p = 20\text{--}50^\circ$. Критичноглибинна сила різання зростає із зменшенням кута різання, що пояснюється збільшенням критичної глибини різання та подачі на різець. Енергоємність робочого процесу, навпаки, мінімальні значення приймає при кутах різання різців $\alpha_p = 20\text{--}30^\circ$, прямо пропорційно зростаючи зі збільшенням ширини траншеї. При кутах різання різців $\alpha_p = 40\text{--}50^\circ$ енергоємність стабілізується та практично не залежить від ширини траншеї. При цьому енергомісткість (відношення енергоємності до продуктивності E_m) робочого процесу при розробці ґрунту II категорії (напівтвердий суглинок) знаходиться в межах: для $b_{\text{бл.}} = 0,02 \text{ м}$ – $E_m = 0,22\text{--}0,39 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{м}^3$; для $b_{\text{бл.}} = 0,03 \text{ м}$ – $E_m = 0,20\text{--}0,22 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{м}^3$, тобто енергомісткість зменшується із збільшенням ширини різців, що підтверджується результатами інших досліджень [34].

Питома сила копання (на критичній глибині різання) чисельно дорівнює енергоємності розробки одного кубічного метра ґрунту та для напівтвердого суглинка (ґрунт II категорії) змінюється від 147,7 кПа для $\alpha_p = 20^\circ$ до 225,8 кПа для $\alpha_p = 50^\circ$, (див. рис. 2.18). Вказані значення суттєво менші за 225–575 кПа, що визначено В.К. Руднєвим і О.М. Стрельниковим [52] для ґрунтів II категорії та традиційних режимів роботи ланцюгових багатоскребкових траншейних екскаваторів.

Висновки за розділом 2

1. Уперше визначена відносна критична глибина блокованого асиметричного різання ґрунтів крайніми боковими різцями, яка при зменшенні кута різання різця від 50° до 20° збільшується за лінійною залежністю від кута різання відповідно:

- для тугопластичної та напівтвердої глини від 1,71 до 3,12;
- для напівтвердого суглинку від 1,76 до 3,27;
- для твердого супіску від 1,78 до 3,75.

2. Із умови рівності критичних глибин блокованого симетричного та асиметричного різання визначена ширина бокових крайніх різців, яка більша за ширину середніх різців, наприклад, для напівтвердого суглинку в 1,63–2,05 рази відповідно для кутів різання 50–20°.

3. Відносна довжина лемешів зменшується за лінійною залежністю при збільшенні кута різання різців від 20 до 50° для блокованого асиметричного різання від 3,52 до 1,63 для напівтвердих суглинку та глини та від 2,52 до 0,93 для твердого супіску; для блокованого симетричного різання зменшується за квадратно-параболічною залежністю від 8,5 до 3,4 для напівтвердого суглинку, від 10,2 до 3,7 для твердого супіску, від 7,7 до 3,2 для напівтвердої глини при збільшенні кута різання від 30 до 50°.

4. Число ліній блокованого різання прямо пропорційно збільшується з шириною траншеї, а висота скребків залежить від ширини різців, їх кута різання, кількості їх на балці, ширини траншеї та фізико-механічних властивостей ґрунтів.

5. Максимальна швидкість різання різців залежить у першу чергу від висоти скребків і коефіцієнтів зовнішнього тертя ґрунту та змінюється, наприклад, для напівтвердого суглинку в межах: для ширини середніх різців 0,02 м від 2,16 до 2,56 м/с; для ширини середніх різців 0,03 м від 1,69 до 1,82 м/с. При цьому технічна продуктивність збільшується відповідно з 91,3 до 171,2 м³/год та з 175,2 до 320 м³/год залежно від ширини траншеї, а робоча швидкість екскаватора змінюється в межах від 0,064 до 0,095 м/с для ширини різців 0,02 м і від 0,097 до 0,133 м/с для ширини різців 0,03 м.

6. Із шириною траншеї для кутів різання 20–50° прямо пропорційно збільшуються сумарні сили різання та копання. Критичноглибинна сила різання зростає зі зменшенням кута різання у зв'язку із збільшенням критичної глибини та подачі на різець.

7. Мінімальні значення енергоємність робочого процесу приймає при кутах різання $\alpha_p = 20\text{--}30^\circ$ та із збільшенням ширини траншеї прямо пропорційно зростає, а при кутах різання різців $\alpha_p = 40\text{--}50^\circ$ стабілізується та практично не залежить від ширини траншеї. Енергоємність, наприклад, для напівтвердого суглинка (грунт II категорії) змінюється від 147, 7 кДж/м³ для $\alpha_p = 20^\circ$ до 225,8 кДж/м³ для $\alpha_p = 50^\circ$, що менше в 1,5–2,5 раза значень енергоємності, що визначені іншими авторами для ґрунтів II категорії та традиційних режимів роботи ланцюгових багатоскребкових траншеєкопачів.

8. Енергомісткість (відношення енергоємності до продуктивності) для напівтвердого суглинка зменшується із збільшенням ширини різців від 0,02 м до 0,03 м з 0,22–0,39 кВт·год/м³ до 0,20–0,22 кВт·год.

Основні положення цього розділу викладені у публікаціях №94, №95, №96, №97, №98.

3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ КРИТИЧНОГЛИБИННОГО БЛОКОВАНОГО РІЗАННЯ ҐРУНТІВ РІЗЦЯМИ ЛАНЦЮГОВО-СКРЕБКОВИХ ТРАНШЕЙНИХ ЕКСКАВАТОРІВ

3.1 Мета і завдання експериментальних досліджень

Метою експериментальних досліджень є підтвердження отриманих теоретичних положень щодо підвищення ефективності багатоскребкових ланцюгових траншейних екскаваторів на основі критичноглибинного різання ґрунтів.

Для цього необхідно експериментально встановити та зіставити з теоретичними наступні дані:

- визначити критичну глибину різання ґрунту крайніми боковими різцями екскаватора та їх ширини;
- визначити довжину лемеша та сили блокованого різання ґрунту різцями (зубами) траншейних екскаваторів;
- визначити числа ліній різання та висоти ґрунтотранспортувальних скребків і різання ґрунту ножово-скребковою секцією робочого органа траншеєкопачів, що одночасно знаходяться в забої.

Для досягнення постановленої мети і завдань розроблена наступна методика і програма польових експериментальних досліджень відповідно до відомих рекомендацій [99–102].

3.2 Схеми вимірювань та техніка проведення експериментальних досліджень блокованого різання ґрунту крайніми боковими різцями екскаватора

Дослідження робочого процесу різання ґрунту крайніми боковими різцями екскаватора проводилися зі зразками зубів ланцюгових наявних

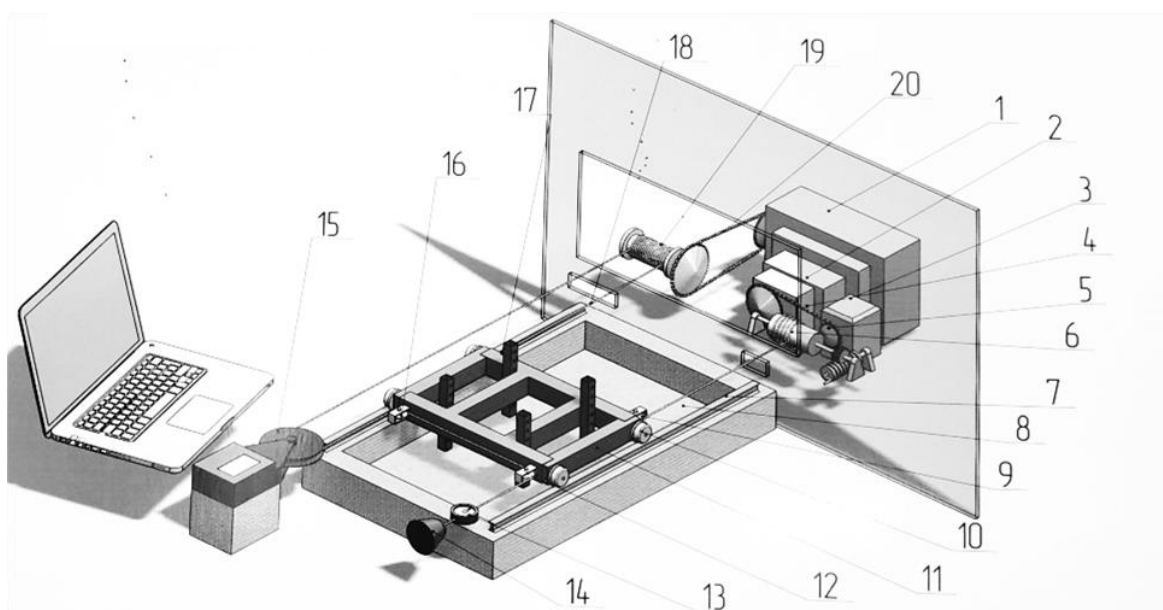
екскаваторів на ґрунтовому каналі кафедри будівельних, дорожніх, меліоративних, сільськогосподарських машин і обладнання НУВГП. Ґрунтовий канал призначений для експериментального дослідження робочих органів землерийних машин і обладнання, що дозволяє визначити зусилля, які діють на окремі вузли і деталі машини; тяговий опір, що виникає при переміщенні робочих органів машин; дозволяє дослідити взаємодію моделей робочих органів з ґрунтом.

Ґрунтовий канал являє собою бетонний лоток з розмірами $10 \times 1,8 \times 1,5$ м, заповнений піщано-глинистою сумішшю, склад якої можна змінювати (рис. 3.1). Над каналом по рейках пересувається динамометрично-тензометричний візок 11, який являє собою зварну конструкцію, що спирається на чотири ходові колеса 10 з ребордами (рис. 3.2, 3.3). Для пересування динамометрично-тензометричного візка запроєктований привід, який забезпечує необхідне тягове зусилля, широкий діапазон швидкостей пересування візка та плавність його ходу. Як силове обладнання прийнято електродвигун трифазного струму 3, трансмісія 1, 2, 4 трактора ДТ-75Б і барабан будівельної лебідки 19.

Обертний момент від двигуна 3 за допомогою ланцюгової передачі 5 передається на вхідний вал ходозменшувача 4 і далі на коробку зміни передач 2. Для збільшення передаточного числа і полегшення керування переміщенням візка використаний задній міст 1 трактора ДТ-75Б, який складається з головної передачі, бортового фрикціона і бортового редуктора. На вихідному валу правого бортового редуктора встановлена ведуча зірочка ланцюгової передачі 20 (див. рис. 3.2), що слугує для передачі обертного моменту на вал барабана 19. Ходозменшувач разом із коробкою зміни передач дозволяє змінити швидкість пересування візка в широких межах від 0,01–3 м/хв. Механізм пересування візка трособлочний. Трос 18 трособлочного механізму одним кінцем закріплюється до ручної лебідки 6, проходить через напрямні блоки візка 9 і 17, виходить на барабан 19, далі на нерухомий блок 15, до якого закріплено електронний динамометр 22 і далі знову на напрямні блоки візка 16, 12.

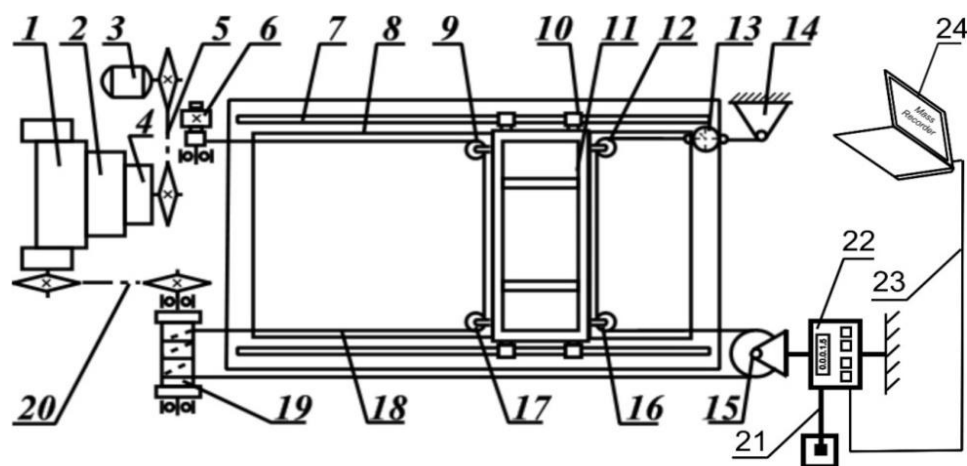


Рисунок 3.1 – Загальний вигляд ґрунтового каналу з тензометричним візком на кафедрі будівельних, дорожніх, меліоративних, сільськогосподарських машин і обладнання НУВГП



- 1 – редуктор; 2 – коробка зміни передач; 3 – електродвигун;
 5 – ланцюгова передача; 6 – лебідка попереднього натягування троса;
 7 – рейкова колія; 8 – ґрунт; 9 – напрямний блок; 10 – ходові котки;
 11 – візок; 12 – напрямний блок; 13 – динамометр; 14 – опора;
 15–17 – напрямний блок; 18 – тяговий трос; 19 – барабан;
 20 – ланцюгова передача

Рисунок 3.2 – 3-D модель ґрунтового каналу з тензометричним візком і реєструючою апаратурою в НУВГП



- 1 – задній міст трактора ДТ-75Б; 2 – коробка зміни передач;
 3 – електродвигун; 4 – ходозменшувач; 5, 20 – ланцюгові передачі;
 6 – ручна лебідка; 7 – рейки; 8 – канал; 9, 12, 16, 17 – напрямні блоки візка;
 10 – котки; 11 – тензовізок; 13 – динамометр; 14 – опора;
 15 – нерухомий блок; 18 – трос; 19 – барабан; 20 – привід барабана;
 21 – кабель живлення електронного динамометра; 22 - електронний
 динамометр Н 1500–1; 23 – СОМ кабель; 24 – ноутбук

Рисунок 3.3 – Кінематична схема привода тензометричного візка

Другим кінцем трос кріпиться до механічного динамометра ДПУ-2-2 13, який з'єднаний з нерухою опорою 14. Візок зварної конструкції 11 обпирається на чотири котки 10 з ребордами і рухається вздовж каналу 8. Така конструкція дозволяє уникнути перекосу візка під час руху вздовж каналу.

Принцип дії динамометра базується на перетворенні сили натягування троса в електричний сигнал, який обробляється електронним блоком, з метою відображення на цифровому індикаторі сили тяги.

У силовому індикаторі (рис. 3.4, 3.5) вимірюється сигнал з тензоперетворювачів і обчислюється сила тяги. Динамометр має цифрову індикацію сили (табло індикації) і світлодіодну індикацію режимів роботи (додаткові індикатори «НУЛЯ» і «ТАРИ»). Керування відбувається через кнопочку клавіатуру. Всією роботою електронного динамометра керує

мікропроцесор за програмою, що записана в постійно запам'ятовувальному пристрої (ПЗП). Налаштування зберігаються в ПЗП, що перепрограмовується. Живлення силового індикатора здійснюється через мережеву вилку. Границя допустимої похибки приладу $\pm 5-10$ Н.



Рисунок 3.4 – Загальний вигляд електронного динамометра ВН-1500-1 з інтерфейсом налаштування на ґрунтовому каналі

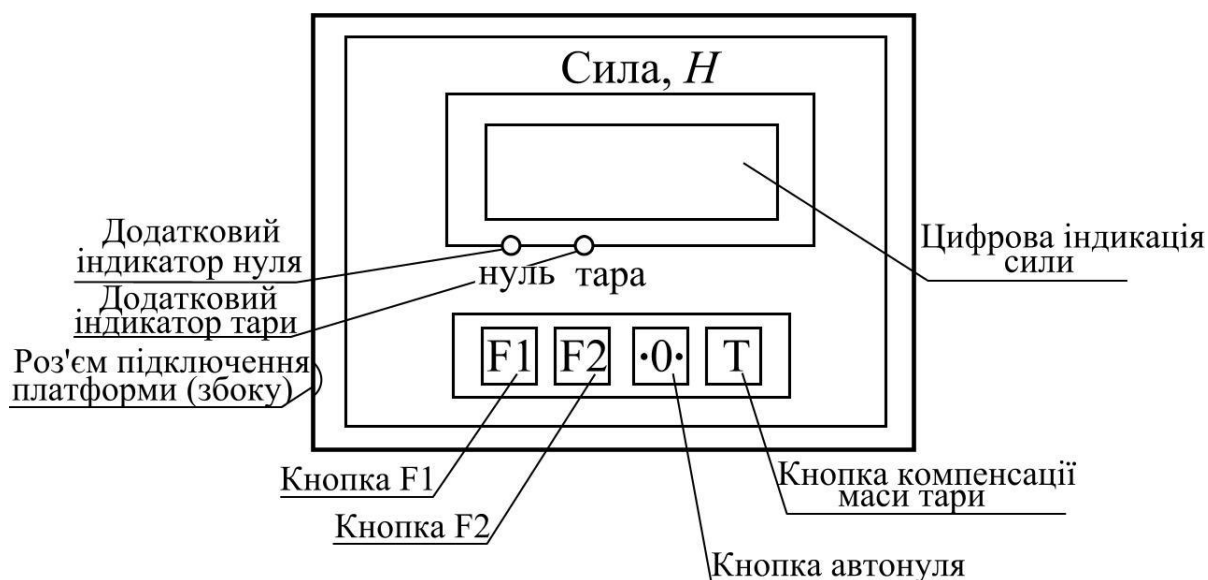


Рисунок 3.5 – Пульт керування силовим індикатором динамометра ВН-1500-1

Призначення кнопок силового індикатора:

- F1 – прямий доступ до режиму додавання сили в пам'ять динамометра;
- F2 – прямий доступ до штучного режиму роботи;
- 0 – кнопка обнулення у випадку дрейфу при ненатягнутому тросі;
- T – кнопка компенсації сили тяги.

Електронний датчик SBA-500L має допустиме значення вимірювання розтягувального зусилля до 500 кГ з максимальним відхиленням 0,083 кГ.

Загальний вигляд змонтованого зуба (ножа) на візку показаний на рис. 3.6. Конструкція дозволяє безступінчасто змінювати ширину лемеша – 2, 3, 4 і 5 см (рис. 3.7), а також глибину різання в межах від 4,0 до 20 см, ступінчасто змінювати кут різання – 20°, 30°, 40° і 50° (рис. 3.8). Кут різання змінювався за рахунок гвинтового з'єднання зуба з лемешем. Зуб монтувався біля однієї із вертикальних стінок ґрунтового каналу.



Рисунок 3.6 – Загальний вигляд змонтованого зуба на візку



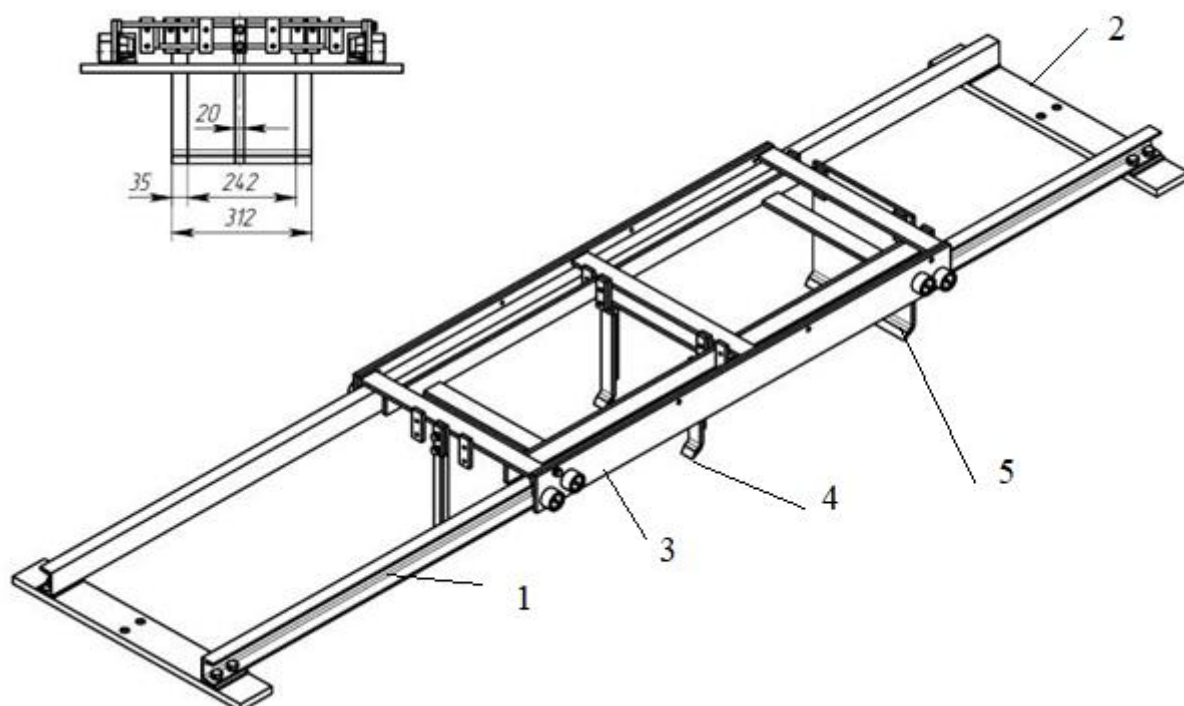
Рисунок 3.7 – Знімні лемеші



Рисунок 3.8 – Регулювання кута різання лемешів зуба

3.3. Забудова стендів та техніка для випробування роботи ножово-скребкових секцій екскаваторів

Для перевірки теоретичних положень щодо визначення сил опору різання ґрунту ножово-скребковими секціями робочого органа розроблено спеціальне стендове обладнання для кріплення ножів робочого органа та його скребків (рис.3.9). Змодульовано процеси розроблення ґрунту різних комбінацій ножів та скребків, які відповідають умовам критично-глибинного різання ґрунту та підрізання між ними ґрунтових виступів зачисними скребками.



1 – напрямні рейки; 2 – основа для кріплення напрямних рейок; 3 – пересувна каретка; 4 – різці; 5 – зачисний скребок

Рисунок 3.9 – Схема стендового обладнання для випробування роботи секцій ножового-скребкового робочого органа ланцюгового екскаватора

Для можливості кріплення ножів та скребків різної комбінації до рами пересувної каретки 2, яка переміщується на роликах за напрямними 1, передбачувані кронштейни з різьбовими отворами. На стенді передбачено два положення кріплення напрямних рейок відносно базової основи 3 – для менших та більших розмірів ширини траншеї. Для кожного такого положення розроблено з відповідними розмірами дві пересувні каретки.

Стенди зроблені переносними з можливістю проведення іспитів обладнання як в природних ґрунтових умовах, так і в ґрунтовому каналі. Для притиснення стенду до поверхні ґрунту та утримання від зміщення утримання напрямні монтажні пластини виготовлено з можливістю їх кріплення до поверхні ґрунту анкерами (рис. 3.10).



Рисунок 3.10 – Анкерне кріплення напрямних стендового обладнання до ґрунту

Усього запропоновано п'ять різних варіантів комбінації ножів та скребків, які призначені для розриття траншей шириною: 166 мм, 248 мм, 312 мм, 458 мм та 466 мм (додаток В), що відповідає призначенню найбільш поширених типів ланцюгових екскаваторів.

Розрахункові значення розмірів зубів та скребків прийняті з умови найменшого значення енергоємності блокованого різання ґрунтів, яке відповідає куту різання різців $\alpha_p = 30^\circ$. Для умови роботи в напівтвердому суглинку їх значення наведені в табл. 3.1.

Відповідно до кожного із запропонованого варіантів зроблено комплект натурних зразків ножів та скребків робочого обладнання екскаватора, які наведені на рис. 3.11. Їх монтаж на пересувній каретці подано на рис. 3.12.

Таблиця 3.1 – Розрахункові розміри робочого обладнання відповідно до ширини траншеї

№ з/п	Ширина траншеї B , мм	Глибина різання $h_{кр}$, мм	Кількість різців, шт.	Ширина середніх різців b_p , мм	Ширина крайніх бокових різців b_p^1 , мм	Висота скребка з різцями, мм	Висота зачисної балки, мм
Вар.1	166	96	2	-	2×35	106	202
Вар.2	248	144	2	-	2×52	161	305
Вар.3	312	96	3	1×20	2×35	113	226
Вар.4	458	96	4	2×20	2×35	78	173
Вар.5	466	144	3	1×30	2×52	172	316

Примітки: $*b_p^1$ – ширина крайніх бокових різців; $b_{бл}$ – ширина середніх різців

*a**б*

а – змінні ножі; б – змінні зачисні скребки

Рисунок 3.11 – Комплект експериментальних зразків робочого обладнання секцій робочого органа ланцюгового екскаватора



Рисунок 3.12 – Встановлення ножів та скребків
на пересувній каретці

Експерименти по дослідженню робочого процесу різання ґрунту секціями ножово-скребкового обладнання екскаваторів проводилося на ґрунтовому каналі кафедри будівельних і дорожніх машин ХНАДУ (рис. 3.13). Для пересування каретки з робочим обладнанням було використано тяглову лебідку каналу.



Рисунок 3.13 – Установлення випробувального обладнання на ґрунтовому каналі та визначення сил опору різання ґрунту ножово-скребковими секціями

Перед установкою випробувального обладнання на ґрунтовому каналі необхідно ущільнити ґрунт до відповідної міцності за допомогою спеціальних роликів котків та додаткового ручного трамбувального пристрою (рис. 3.14). Міцність ґрунту та його фізико-механічні властивості максимально наближені до теоретичних розрахункових умов для суглинку II категорії міцності. Контроль міцності ґрунту відбувався за допомогою ударника-щільноміра ДорНДІ та відповідав 5–6 ударам.



Рисунок 3.14 – Ущільнення ґрунту розкочувальними котками

Монтаж випробувального стенду на ґрунтовому каналі та процес визначення сил опору різання ґрунту ножово-скребковими секціями показано на рисунку рис. 3.15 а. Для визначення сили опору різання ґрунту ножово-скребковими секціями відбувалося з використанням електронного



а



б

а – закріплення динамометра на стенді; б – електронний динамометр із

в

б

Рисунок 3.15 – Визначення сил опору різання ґрунту

д

о

в

Принцип дії динамометра заснований на перетворенні сили натягування троса в електричний сигнал, який обробляється за допомогою відповідної програми на ноутбукі та відображається у вигляді осцилограм на моніторі.

3.4. Схеми вимірювань, система запису та обробки експериментальних даних

3.4.1. Визначення критичної глибини асиметричного блокованого різання

Процес блокованого різання ґрунтів характеризується наявністю критичної глибини різання $h_{кр}$, яка розділяє забій на дві зони (див. рис. 2.1): зону сколу ґрунту до денної поверхні і зону пружнопластичної деформації, що супроводжується витісненням ґрунту в бокові стінки і дно щілини.

На границі цих зон маємо рівновагу сил сколу у всіх напрямках, при цьому зсув ґрунту в бік денної поверхні проходить із деякої глибини $h_c < h_{кр}$ з утворенням бокових розширень і вертикальних ділянок прорізів висотою $(h_{кр} - h_c)$. При заглибленні ножа з незмінними геометричними параметрами відношення глибини h_c бокових розширень прорізу до повної глибини різання є постійним.

При подальшому збільшенні глибини різання ріст бічних розширень зупиняється, а висота вертикальних ділянок зростає і відношення h_c/H зменшується. Таким чином, критичну глибину різання можна визначити експериментально заміром величини бічних розширень прорізу на денній поверхні в залежності від глибини різання.

На критичній глибині виникають зміни у співвідношеннях глибини розширеної ділянки прорізу до повної глибини різання. Ці зміни відображаються в силових залежностях процесу.

Критична глибина різання визначалася шляхом замірювання бічних розширень у залежності від глибини (рис. 3.16) в момент закінчення зростання бічних розширень прорізу ($B = B_{\max} = \text{const}$) за залежністю (див. 2.4, б)

$$h_{\text{кр}} = \frac{(B_{\max} - b'_p) \text{tg} \gamma}{k_{\text{пер}}}. \quad (3.1)$$

де $B_{\max}$ – максимальна ширина прорізу на денній поверхні;

b'_p – ширина прорізу на критичній глибині різання (ширина крайніх бокових різців);

γ – кут нахилу бічних стінок прорізу до горизонту у проєкції на фронтальну площину;

$k_{\text{пер}}$ – перехідний коефіцієнт (2.3) ($k_{\text{пер}} = 0,9\text{--}0,95$).



Рисунок 3.16 – Заміри глибин та бічних розширень прорізів

Кут нахилу бічних стінок прорізу до горизонту у проєкції на фронтальну площину для ґрунтових умов каналу НУВГП експериментально визначений у роботі [81]. Для блокованого різання знаходиться в межах $\gamma = 57\text{--}59^\circ$.

3.4.2. Визначення довжини лемеша

Для визначення довжини лемеша при блокованому різанні використовувалась методика, суть якої полягає у наступному. Оскільки в нашому випадку тензометричний ніж розробляє ґрунт на критичну глибину, то горизонтальна складова P_c опору переміщення досягає максимуму в момент відділення стружки від масиву (рис. 3.17).

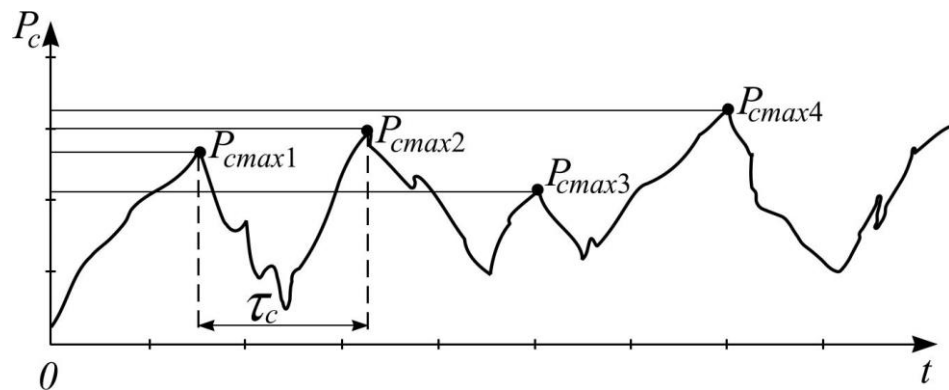


Рисунок 3.17 – Силовая комп'ютерна діаграма

Тому можна припустити, що відстань τ_c між піками осцилограми визначає час t_c сколу ґрунтового елемента

$$\tau_c = \vartheta_{\epsilon} t_c, \quad (3.2)$$

де ϑ_{ϵ} – швидкість руху візка.

Враховуючи геометричні співвідношення між кутами різання α_p і сколу стружки ψ , довжина лемеша визначається (див. рис. 2.4, а):

$$l_L = \frac{\tau_c}{\sin \alpha_p (\operatorname{ctg} \alpha_p + \operatorname{ctg} \psi) k_{\text{пер}}} . \quad (3.3)$$

Кут зсуву ψ визначений у роботі [95].

3.4.3. Визначення сили різання випробувальним зубом та ножово-скребковою секцією робочого органа екскаватора

Відповідно до схеми запасовки тягового троса тензометричного візка (див. рис. 3.3) опір переміщенню візка (опір переміщенню робочого органа) визначається за показами електронного динамометра.

3.4.4. Визначення повторності дослідів

Для забезпечення заданої точності однофакторних експериментів повторність дослідів визначається за методикою [36]

$$n = \frac{Z^2 V^2}{\varepsilon^2}, \quad (3.4)$$

де V – коефіцієнт варіації сили руйнування ґрунту землерийним робочим органом;

ε – відносна помилка середньої арифметичної величини, що заміряється (задається в межах $\varepsilon = 0,05-0,1$ – для лабораторних досліджень);

Z – функція, яка характеризує ймовірність потрапляння середньо-максимального значення сили руйнування в заданий довірчий інтервал (коефіцієнт Стюдента) та визначається за таблицями значень інтеграла ймовірності відповідно із заданою надійністю [101] для довірчої ймовірності 0,95 $Z=1,96$.

Тоді повторюваність дослідів при відомій (заданій) похибці вимірювального каналу визначається коефіцієнтом варіації V , який визначається у попередніх дослідах таким чином:

– заміряється електронним динамометром значення сили P_c у вигляді комп'ютерної діаграми (див. рис. 3.16);

– визначають середньомаксимальне значення зусилля руйнування ґрунту

$$P_{\text{сеп}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_{c \text{ max}} \quad (3.5)$$

де n – число обрахованих точок максимальних зусиль на комп'ютерній діаграмі;

$P_{c \text{ max}}$ – числові значення цих зусиль.

– визначають середньоквадратичну помилку (стандарт вимірювань)

$$\sigma \approx S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (P_{c \text{ max}} - P_{\text{сеп}})^2}. \quad (3.6)$$

Середньоквадратичною помилкою σ називають границю, до якої прямує величина S при збільшенні числа вимірювань до безкінечності, тобто при $n \rightarrow \infty$;

– визначають коефіцієнт варіації V як відношення стандарту до середньомаксимального значення

$$V = \frac{S}{P_{\text{сеп}}}; \quad (3.7)$$

– визначають необхідну кількість точок максимальних зусиль, які необхідно опрацювати на діаграмі (повторність дослідів) за формулою (3.4).

Для визначених умов кількість повторювань експериментів була прийнята 4–5 разів.

Для переходу від повторюваності дослідів за визначенням сили різання ножами до довжини шляху різання необхідно використати формули для різання у верхньому ярусі [80]

$$L_{p1} \geq 0,8nh_{p1}, \quad (3.8)$$

де h_{p1} – глибина різання у верхньому ярусі.

Енергоємність руйнування ґрунту визначається як відношення роботи, виконаної на одиниці шляху, до об'єму зруйнованого ґрунту на цьому шляху

$$E = \frac{P_{\text{сер}} \cdot 1 \text{ м}}{F_{\text{пр}} \cdot 1 \text{ м}}, \quad \frac{\text{дж}}{\text{м}^3} \quad (3.9)$$

де $F_{\text{пр}}$ – середня площа поперечного перерізу прорізу.

3.5. Результати експериментальних досліджень

3.5.1. Результати досліджень критичної глибини асиметричного блокованого різання крайніми боковими різцями

Дослідження проводилися на ґрунтовому каналі кафедри будівельних, дорожніх, меліоративних, сільськогосподарських машин і обладнання НУВГП у суглинистому ґрунті вологістю 10–20 %, зчеплення частинок ґрунту у межах 0,04–0,06 МПа, а число ударів ударника ДорНДІ – 6–10.

Результати досліджень приведені в табл. 3.1–3.4 і у вигляді графіків на рис. 3.18–3.24.

Таблиця 3.1 – Середні експериментальні значення ширини прорізу B (см) на денній поверхні при критичноглибинному різанні ($b'_p = 0,02 \text{ м}$)

α_p , град h , см	20°	30°	40°	50°
2	3,2	3,1	2,9	3,0
4	4,4	4,3	4,2	3,8
6	5,6	5,2	4,5	4,0
8	6,0	5,1	4,6	3,9
10	5,9	5,3	4,7	4,0
$h_{\text{кр}}$, см	6,6	5,4	4,5	3,2

Таблиця 3.2 – Середні експериментальні значення ширини прорізу B (см) на денній поверхні при критичноглибинному різанні ($b'_p = 0,03\text{м}$)

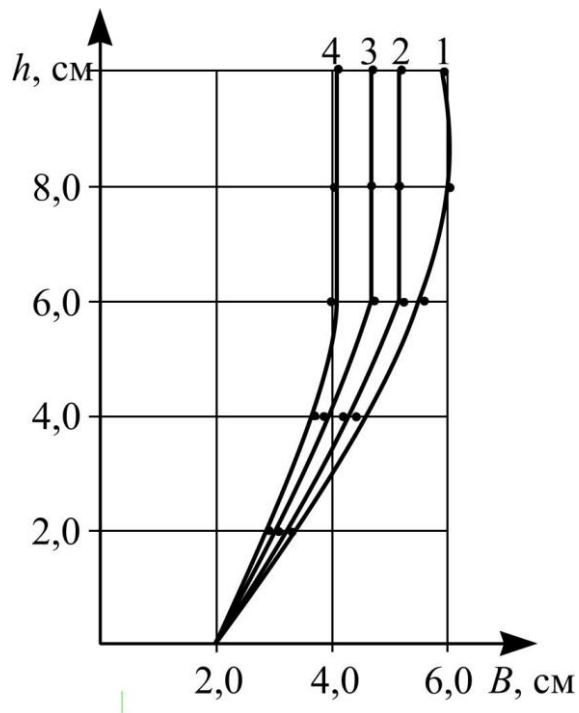
α_p , град h , см	20°	30°	40°	50°
4	5,4	5,3	5,2	5,2
6	6,6	6,5	6,2	6,0
8	8,0	7,9	7,0	6,1
10	8,8	8,0	6,8	5,9
12	8,7	7,9	7,0	6,2
$h_{кр}$, см	9,66	8,3	6,6	5,12

Таблиця 3.3 – Середні експериментальні значення ширини прорізу B (см) на денній поверхні при критичноглибинному різанні ($b'_p = 0,04\text{м}$)

α_p , град h , см	20°	30°	40°	50°
6	7,6	7,5	7,3	7,1
8	8,7	8,6	8,4	8,2
10	9,9	9,7	9,4	8,0
12	11,5	10,5	9,2	7,9
14	12,0	10,0	9,3	8,1
$h_{кр}$, см	13,02	10,5	8,9	6,8

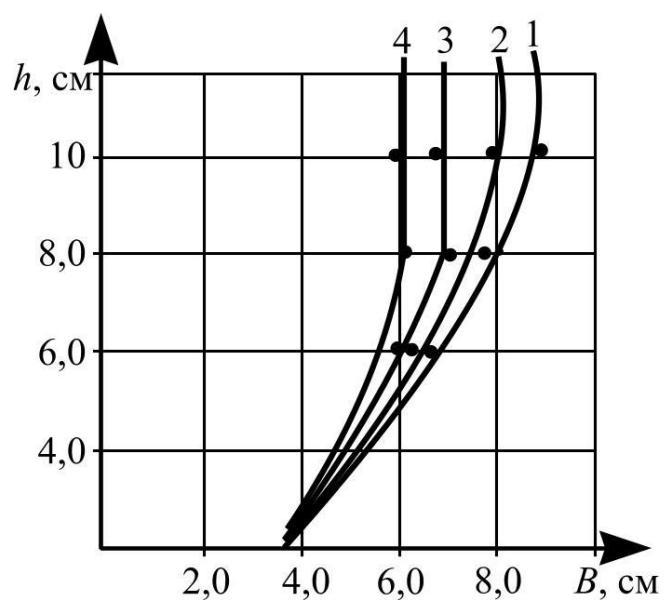
Таблиця 3.4 – Середні експериментальні значення ширини прорізу B (см) на денній поверхні при критичноглибинному різанні ($b'_p = 0,05$ м)

α_p , град h , см	20°	30°	40°	50°
6	8,5	8,5	8,3	8,4
8	9,8	9,6	9,5	9,6
10	11,0	10,9	10,7	10,2
12	12,1	11,5	11,7	10,1
14	13,3	13,2	11,5	10,3
16	14,7	13,1	11,7	10,0
18	14,5	13,0	11,6	10,2
$h_{кр}$, см	16,1	13,6	11,1	8,7



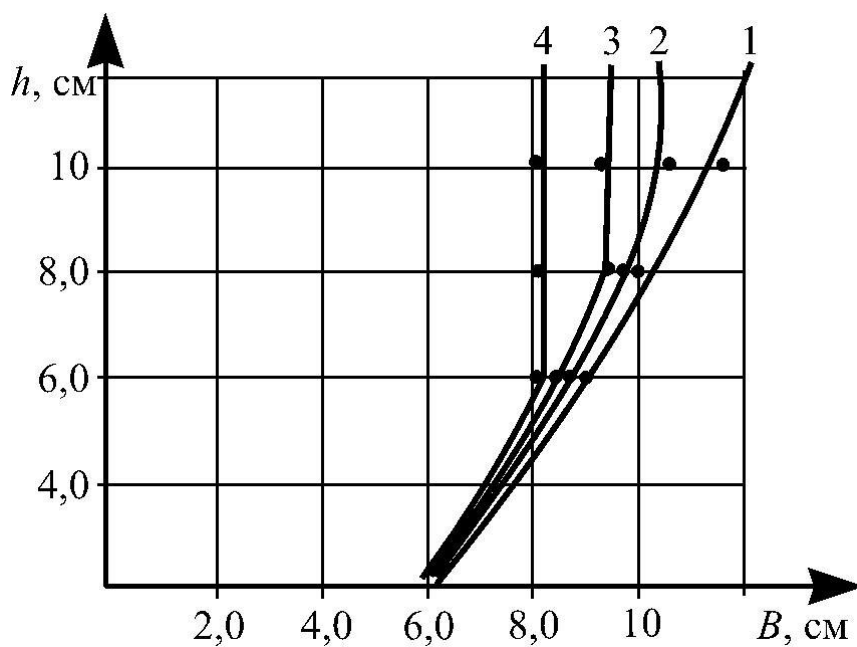
1 – $\alpha_p = 20^\circ$; 2 – $\alpha_p = 30^\circ$; 3 – $\alpha_p = 40^\circ$; 4 – $\alpha_p = 50^\circ$

Рисунок 3.18 – Залежність ширини прорізу на денній поверхні від глибини різання ($b'_p = 0,02$ м)



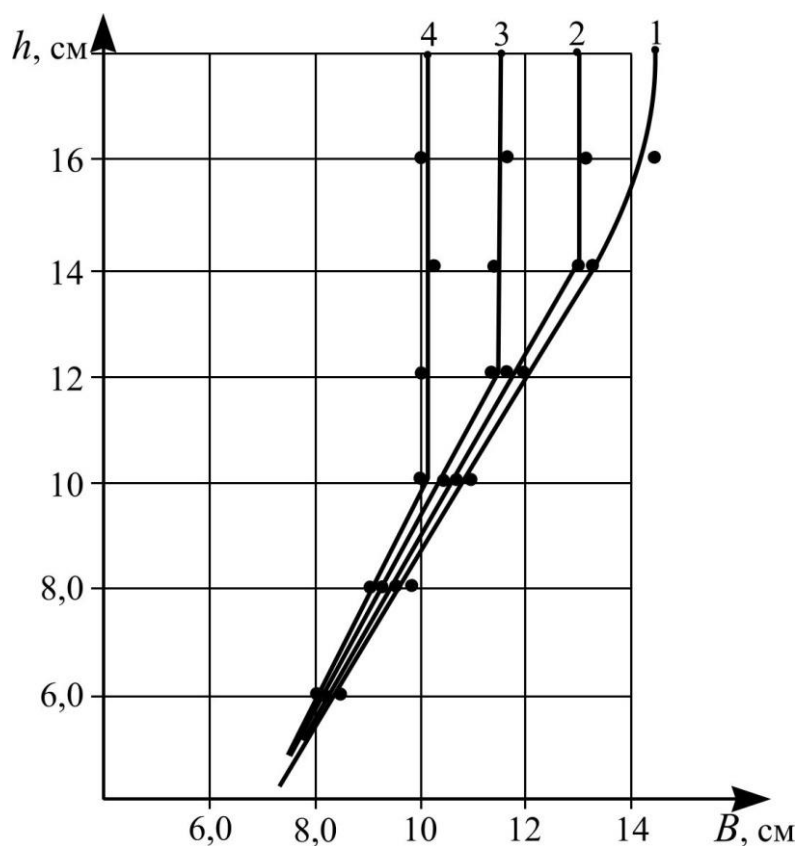
1 – $\alpha_p = 20^\circ$; 2 – $\alpha_p = 30^\circ$; 3 – $\alpha_p = 40^\circ$; 4 – $\alpha_p = 50^\circ$

Рисунок 3.19 – Залежність ширини прорізу на денній поверхні від глибини різання ($b'_p = 0,03$ м)



1 – $\alpha_p = 20^\circ$; 2 – $\alpha_p = 30^\circ$; 3 – $\alpha_p = 40^\circ$; 4 – $\alpha_p = 50^\circ$

Рисунок 3.20 – Залежність ширини прорізу на денній поверхні від глибини різання ($b'_p = 0,04$ м)



$$1 - \alpha_p = 20^\circ; 2 - \alpha_p = 30^\circ; 3 - \alpha_p = 40^\circ; 4 - \alpha_p = 50^\circ$$

Рисунок 3.21 – Залежність ширини прорізу на денній поверхні від глибини різання ($b'_p = 0,05$ м)

Із графіків видно, що за деякої глибини різання ширина прорізу на денній поверхні стабілізується та при подальшому заглибленні різця не змінюється. Ця ширина залежить від ширини різця та кута його різання. Для ширини різця:

- для $b'_p = 0,02$ м в залежності від кута різання ширина прорізу B змінюється від 3,9–4,0 см до 5,9–6,0 см;
- для $b'_p = 0,03$ м – від 5,9–6,2 см до 8,7–8,8 см;
- для $b'_p = 0,04$ м – від 7,9–8,2 см до 11,5–12,0 см;
- для $b'_p = 0,05$ м – від 10,0–10,3 см до 14,5–14,7 см.

При цьому відносна критична глибина асиметричного блокованого різання зменшується зі збільшенням кута різання по лінійній залежності та знаходиться в межах: 1,69 для кута різання 50° та 3,25 для кута різання 20° (рис. 3.17). Розбіжність між експериментальними та теоретичними даними не перевищує 7,5 %.

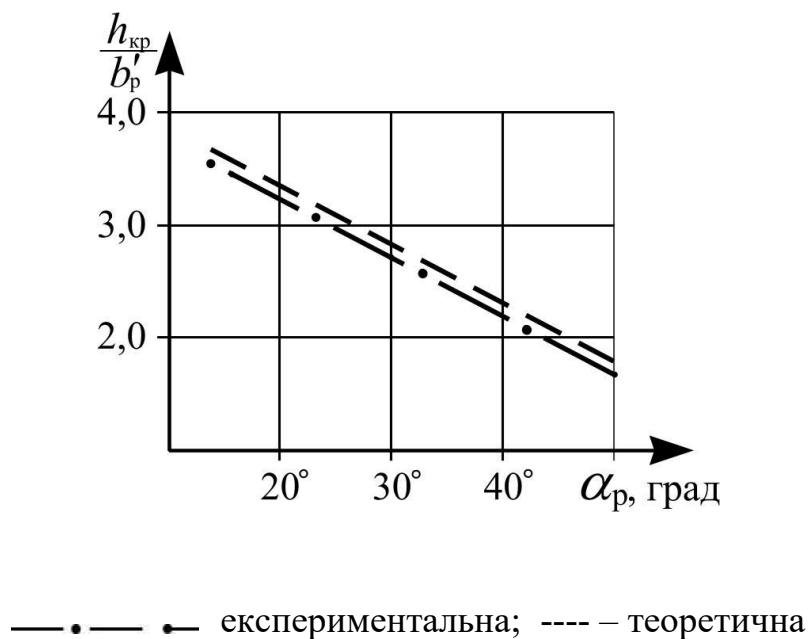
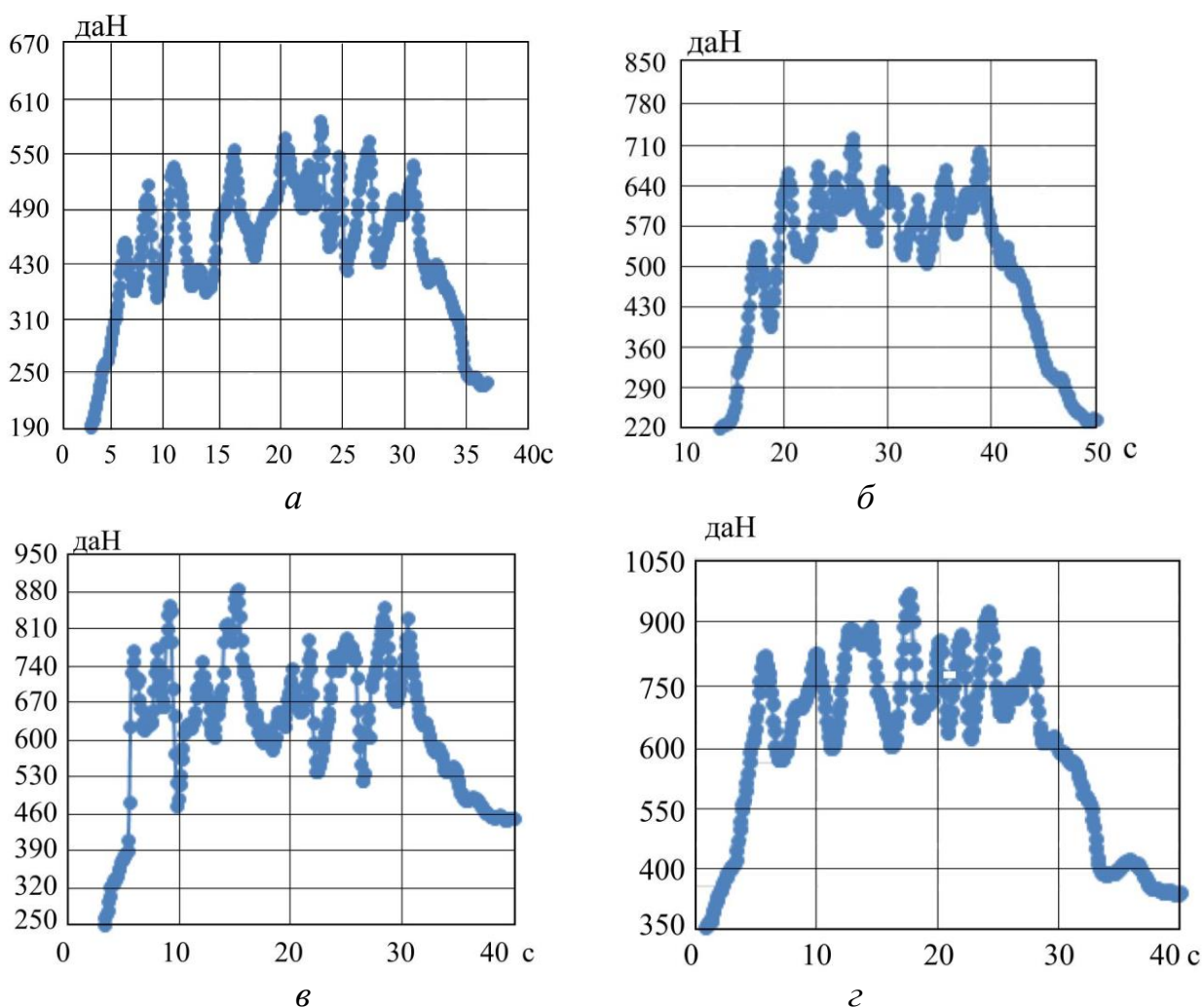


Рисунок 3.22 – Середні значення відносної критичної глибини різання крайніми боковими різцями

3.5.2. Результати досліджень довжини лемеша крайніх бокових різців

Ґрунтові умови проведення дослідів аналогічні умовам визначення критичної глибини різання. Швидкість переміщення візка в ході проведення експериментів дорівнювала $\vartheta_g = 0,0625$ м/с (2,75 м/хв).

На рис. 3.23 наведені осцилограми різання ґрунту на критичну глибину.



а – $\alpha_p = 20^\circ$, $b'_p = 0,06$ м; б – $\alpha_p = 30^\circ$, $b'_p = 0,07$ м;

в – $\alpha_p = 40^\circ$, $b'_p = 0,09$ м; г – $\alpha_p = 50^\circ$, $b'_p = 0,11$ м

Рисунок 3.23 – Осцилограми асиметричного блокового різання
грунту на критичну глибину 0,2 м

Щоб критична глибина різання 0,2 м була незмінною при зміні кута різання ширина різців збільшувалася із збільшенням кута різання:

– для $\alpha_p = 20^\circ$, $b'_p = 0,06$ м;

– для $\alpha_p = 30^\circ$, $b'_p = 0,07$ м;

– для $\alpha_p = 40^\circ$, $b'_p = 0,09$ м;

– для $\alpha_p = 50^\circ$, $b'_p = 0,11$ м.

По осцилограмах визначений середній час і крок сколювання ґрунту, які дорівнюють відповідно:

- для $\alpha_p = 20^\circ$ – $t_{\text{сер}} = 4,17$ с, $\tau_c = 0,260$ м;
- для $\alpha_p = 30^\circ$ – $t_{\text{сер}} = 3,75$ с, $\tau_c = 0,234$ м;
- для $\alpha_p = 40^\circ$ – $t_{\text{сер}} = 3,28$ с, $\tau_c = 0,205$ м;
- для $\alpha_p = 50^\circ$ – $t_{\text{сер}} = 3,0$ с, $\tau_c = 0,188$ м.

На рис. 3.24 наведені залежності відносної довжини лемеша від кута різання різця.

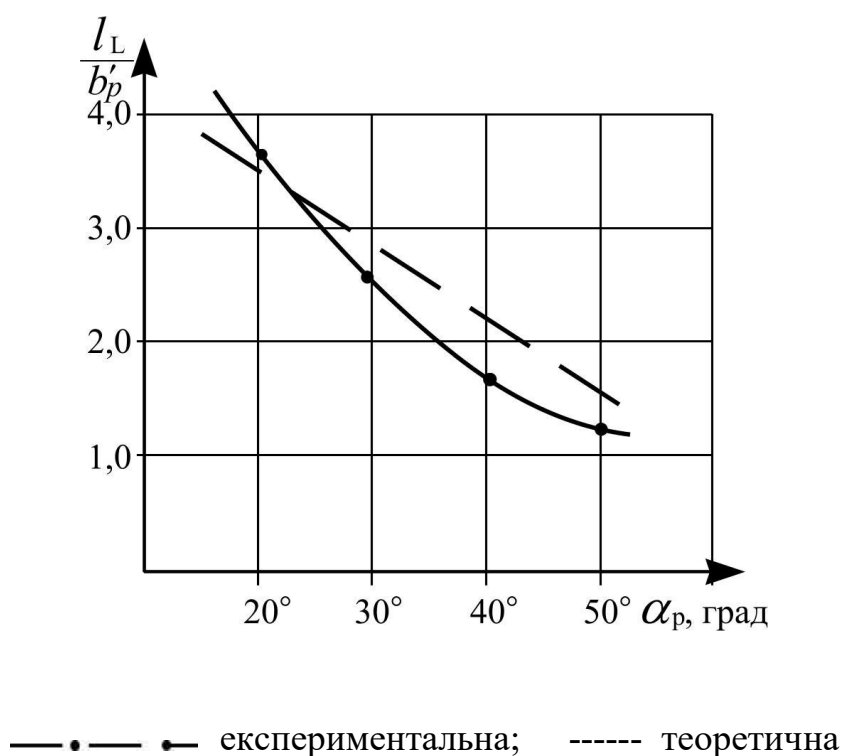


Рисунок 3.24 – Залежність відносної довжини лемеша від кута різання крайнього бокового різця

Відносна довжина лемеша зменшується із збільшенням кута різання від 20° до 50° від 3,68 до 1,24. Розбіжність між експериментальними та теоретичними даними пояснюється різними коефіцієнтами зчеплення ґрунту. Для теоретичних розрахунків коефіцієнт зчеплення прийнятий $c = 0,04$ МПа, а в ході експериментів цей коефіцієнт змінювався у межах $c = 0,04\text{--}0,06$ МПа.

3.5.3. Результати досліджень критично-глибинного різання ґрунту ножово-скребковими секціями робочого обладнання

Дослідження процесів різання ґрунту ножово-скребковими секціями робочого обладнання проводилися в умовах ґрунтового каналу кафедри будівельних, дорожніх машин ХНАДУ. Для реалізації процесу використаний лоток з ґрунтом, на якому встановлювався експериментальний стенд з різними комбінаціями різців та скребків відповідно до прийнятої методики. Переміщення візка з секцією робочого обладнання відбувалося тросовим приводом ґрунтового каналу.

Ґрунтові умови відповідали фізико-механічним властивостям суглинку, вологість у межах 17–19 %, зчеплення частинок ґрунту спостерігалось в межах 0,03–0,04 МПа, а число ударів ударника ДорНДІ склало 3–5.

Заміри сил опору ґрунту проводилися при повному заповненні ґрунту зачисним скребком, коли процес набув стабільного характеру (рис. 3.25).



Рисунок 3.25 – Процес руйнування ґрунту ножово-скребковою секцією робочого обладнання

Результати замірів експериментальних даних сил опору ґрунту різання різцями та їх сумарний опір разом з його транспортуванням скребковим робочим органом в кожному з розглянутих варіантів компоновки ножово-скребкового обладнання та їх зіставлення з розрахунковими даними наведені в табл. 3.5 та 3.6.

Таблиця 3.5 – Зіставлення результатів експериментальних та розрахункових даних сил опору різання ґрунту різцями секцій

№ варіанта	Ширина захвату, мм	Опір ґрунту різанню, кН		Розбіжності, %
		експеримент. дані	розрахункові значення	
Варіант 1	166	0,90	0,82	9,7
Варіант 2	248	1,50	1,32	13,9
Варіант 3	312	1,90	1,72	10,5
Варіант 4	458	2,90	2,68	8,2
Варіант 5	466	3,10	2,84	9,1

Таблиця 3.6 – Зіставлення результатів експериментальних та розрахункових сумарних сил опору різання ґрунту ножово-скребковими секціями

№ варіанта	Ширина захвату, мм	Сумарний опір ґрунту копанню, кН		Розбіжності, %
		експеримент. дані	розрахункові значення	
Варіант 1	166	1,70	1,51	12,7
Варіант 2	248	2,80	2,52	11,1
Варіант 3	312	3,50	3,18	10,1
Варіант 4	458	4,70	4,30	9,3
Варіант 5	466	5,40	4,84	11,6

З наведених даних можна зробити висновки про те, що теоретичні розрахункові дані мають достатньо високу збіжність з експериментальними, що перебуває в межах 17%.

Висновки за розділом 3

1. Розроблені методики визначення відносної критичної глибини асиметричного блокованого різання та відносної довжини лемеша на критичній глибині різання.

2. Установлено, що відносна критична глибина асиметричного блокованого різання зменшується за лінійною залежністю від 3,25 до 1,69 зі збільшенням кута різання різця з 20° до 50° .

3. Установлено також, що відносна довжина лемеша на критичній глибині різання зі збільшенням кута різання від 20° до 50° зменшується від 3,68 до 1,24.

4. Результати експериментальних досліджень підтверджують достовірність математичних моделей і прийнятих припущень у розрахункових схемах. Розбіжності між експериментальними даними та розрахунковими значеннями не перевищують 11–12 %.

4. ПРАКТИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ ДО ВПРОВАДЖЕННЯ КРИТИЧНОГЛИБИННОГО БЛОКОВАНОГО РІЗАННЯ ҐРУНТІВ РІЗЦЯМИ ЛАНЦЮГОВО-СКРЕБКОВИХ ТРАНШЕЙНИХ ЕКСКАВАТОРІВ

4.1. Створення методики розрахунку параметрів ланцюгово-скребкових траншейних екскаваторів на основі критичноглибинного різання ґрунтів

Найбільш значущою складовою процесу копання ґрунту ланцюгово-скребковим робочим органом є різання ґрунту різцями (зубами) та скребками (балками). Під час розрахунку сил різання робочий орган приймається як складна механічна система тягових ланцюгів і скребоків, на яких у визначеному порядку розставлені та закріплені різці з відомими кутовими параметрами. Відділення стружки від масиву ґрунту здійснюється скребками-різцями в умовах блокового, напівблокового та вільного різання ґрунту. У схемах з блокованим та вільним різанням установлені також зачисні скребки без різців. Слід також мати на увазі зміну питомого опору та енергоємності різання ґрунту зі зміною товщини стружки [36, 103]. Мінімальну енергоємність руйнування ґрунту маємо на критичній глибині різання [36]. Тому методика розрахунку параметрів ланцюгово-скребкових робочих органів траншейних екскаваторів ґрунтується на критичноглибинному різанні ґрунтів.

Вихідними даними для розрахунку є: ширина різців $b_{\text{бл}}$, м і їх кут різання α_p , град; максимальна глибина траншеї H , м; ширина траншеї B , м; фізико-механічні характеристики ґрунтів (коефіцієнт зчеплення c , МПа; питома сила тяжіння $\gamma_{\text{гр}}$, МН/м³, кути внутрішнього ϕ_0 і зовнішнього тертя ϕ , град).

Розрахунок параметрів проводиться у такій послідовності:

1. Вибирається мінімальна ширина різців із умови міцності їх на згин при зустрічі різця з перешкодою. Для напівблокового різання $b_{\text{н.бл}}^{\text{min}} = 0,01$ м. Відомо [77], що критична глибина прямо пропорційна ширині різця і для

блокованого різання у 2 рази менша за критичну глибину різання напівблокованого різання. Тому, щоб всі різці працювали на критичній глибині, необхідно прийняти для блокованого різання $b_{\text{бл}}^{\text{min}} = 2b_{\text{н.бл}}^{\text{min}} = 0,02 \text{ м}$.

В подальшому визначається (рис. 4.1):

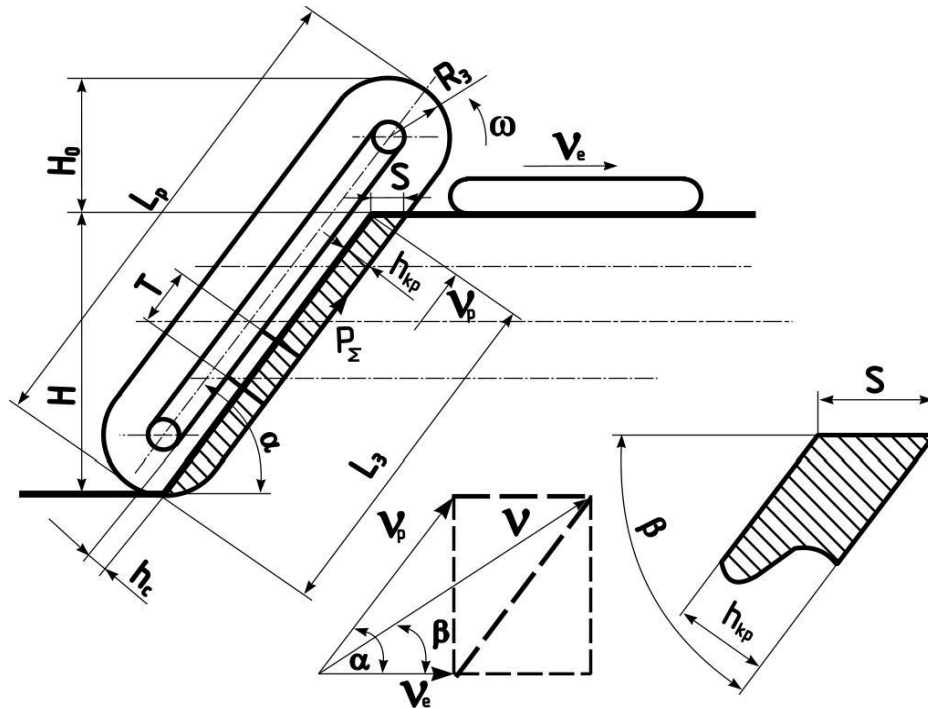


Рисунок 4.1 – Розрахункова схема взаємодії робочого органа з ґрунтом

2. Критична глибина різання

$$h_{\text{кр}} = \frac{a \cdot \sigma_{\text{бл}}}{(\text{tg} \alpha_p)^n \cdot k_{\text{бок}}}, \text{ м}, \quad (4.1)$$

де a і n – коефіцієнти, які залежать від фізико-механічних властивостей ґрунту (типу ґрунту), визначені аналітичним способом у залежності від загальновідомих вихідних даних ґрунтів і наведені в літературі [77, 80];

α_p – кут різання, за якого енергоємність мінімальна ($\alpha_p = 25\text{--}35^\circ$) [107];

$k_{\text{бок}}$ – відношення глибини сколювання ґрунту до критичної глибини різання в момент утворення елемента стружки ($k_{\text{бок}} = 0,9\text{--}0,95$).

3. Кут нахилу бокових розширень прорізу до горизонту (при блокованому різанні) [107]

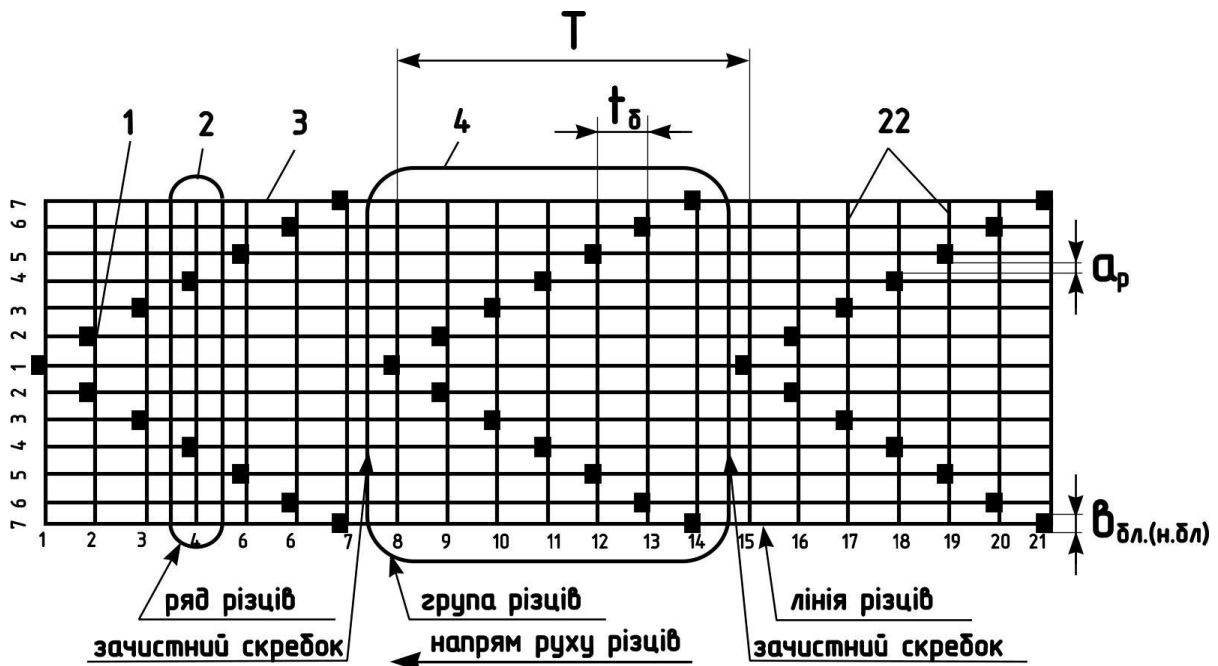
$$\gamma = \arccos \left[\frac{c \cdot \cos \varphi_0}{\left(1 - 0,74 \operatorname{tg} \varphi_0 - \frac{1,52 \cdot c}{q_{\text{кр}}} \right) q_{\text{сер}}} \right] - \varphi_0, \text{ град} \quad (4.2)$$

де c – коефіцієнт зчеплення, МПа;

φ_0 – кут внутрішнього тертя ґрунту, град;

$q_{\text{кр}}, q_{\text{сер}}$ – критичне та середнє значення тиску на ґрунторозробний орган, визначаються відповідно [106], МПа.

4. Відстань між суміжними ґрунторозробними органами (різцями, скребками) (рис. 4.2).



1 – різець; 2 – ряд різців; 3 – лінія різців; 4 – група різців;

1–21 – номери різців; 22 – скребки(балки)

Рисунок 4.2 – Ступенева (блокована, напівблокована)
схема розставляння різців:

Для схеми з блокованим різанням

$$h_{кр} = \frac{a \cdot e_{бл}}{(\operatorname{tg} \alpha_p)^n \cdot k_{бок}}, \text{ м.} \quad (4.3)$$

5. Число ліній різання із умови:

для схеми з блокованим різанням [2, 34]

$$B = i_{л}^{бл} \cdot e_{бл} + (i_{л}^{бл} - 1) \cdot a_p \quad (4.4)$$

звідки

$$i_{л}^{бл} = \frac{B + a_p}{e_{бл} + a_p}, \text{ шт.} \quad (4.5)$$

Формула (4.5) отримана із умови, що зовнішні бокові грані крайніх бокових різців взаємодіють з вертикальними стінками траншеї. Число ліній різання необхідно округлити до найближчого цілого числа та уточнити ширину траншеї за залежністю (4.4).

6. Якщо в ряду встановлено по 2 різці, то кількість їх рядів (балок) дорівнює

$$Z_6 = 1 + \frac{i_{л} - 1}{2} = \frac{i_{л} + 1}{2}, \text{ шт.} \quad (4.6)$$

Z_6 необхідно округлити до цілого числа в меншу сторону.

7. Різання ґрунту на критичній глибині можливе за умови, якщо для групи різців, що знаходяться в забої, виконується умова

$$\frac{T}{S_1} = \frac{v_p}{v_e} \quad (4.7)$$

де T – крок установалення однойменних різців у сусідніх групах ґрунторозробних органів (див. рис. 4.2), м;

v_p – швидкість різання (ланцюга), м/с;

v_e – робоча швидкість екскаватора, м/с;

$$S_1 - \text{подача на один різець} \left(S_1 = \frac{v_e \cdot t_p}{Z_{\text{гр}}^3} \right).$$

Тому

$$T = \frac{v_e \cdot t_p}{Z_{\text{гр}}^3} \cdot \frac{v_p}{v_e} = \frac{v_p \cdot t_p}{Z_{\text{гр}}^3} = \frac{H}{Z_{\text{гр}}^3 \sin \beta}, \text{ м} \quad (4.8)$$

де $Z_{\text{гр}}^3$ – кількість груп різців, що одночасно знаходяться в забої;

t_p – час різання, с.

При такому кроці розташування різців будуть діяти мінімальні динамічні навантаження на приводні ланцюги, оскільки різання буде здійснюватися постійним числом різців.

8. Крок встановлення балок (див.рис. 4.2)

$$t_6 = \frac{T}{Z_6} = \frac{H}{Z_{\text{гр}}^3 \cdot Z_6 \cdot \sin \beta}, \text{ м.} \quad (4.9)$$

9. Кількість груп різців, що одночасно знаходяться в забої, визначається з умови балансу потужності двигуна. Якщо $T = H / \sin \beta$

$$Z_{\text{гр}}^3 = \frac{l_3}{T} = \frac{H / \sin \beta}{H / \sin \beta} = 1, \text{ шт.} \quad (4.10)$$

10. Висота скребків (балок) з різцями h_c . визначається з умови, що на балці встановлено по два різці та зруйнований ними ґрунт (з урахуванням його розпушення) заповнює міжскребковий об'єм між двома суміжними транспортувальними балками (скребками), що встановлені з кроком t_6 (див. рис. 4.2). Тому для кожної групи різців повинна виконуватись умова:

для блокового різання, якщо α_p визначається за залежністю (4.3)

$$h_c^{\text{бл}} \cdot \frac{BT}{Z_6^{\text{бл}}} \geq 2h_{\text{кр}} \cdot (e_{\text{бл}} + h_{\text{кр}} \cdot k_{\text{бок}}^2 \cdot \text{ctg} \gamma) \cdot k_p \frac{H}{\sin \beta}. \quad (4.11)$$

З урахуванням залежності (4.8) маємо:

для блокованого різання

$$h_c^{\text{бл}} \geq \frac{2h_{\text{кр}} \cdot Z_6^{\text{бл}} \cdot Z_{\text{гр}}^3}{B} \cdot (e_{\text{бл}} + h_{\text{кр}} \cdot k_{\text{бок}}^2 \cdot \text{ctg} \gamma) \cdot k_p, \text{ м}, \quad (4.12)$$

де k_p – коефіцієнт розпушення ґрунту ($k_p = 1,08\text{--}1,32$) відповідно для ґрунтів I–IV категорій [2, 34].

Висота зачисних скребків (без різців)

$$h_{\text{зс}} = h_c + h_{\text{кр}}, \text{ м}. \quad (4.13)$$

Якщо на балках-скребка встановлено по одному різцю, то у чисельнику формули (4.12) відсутній множник «2». Для блокованого різання це буває за умови, якщо $i_{\text{л}}^{\text{бл}} = 2$; $Z_6^{\text{бл}} = 2$.

11. Швидкість різання ϑ_p залежить від кутової швидкості приводної зірочки ω та радіуса різання. Кутова швидкість ω обґрунтована на основі визначення часу t_p та кута розвантаження φ_p залежно від коефіцієнтів зовнішнього тертя ґрунту μ_1 та висоти скребка h_c за умови, що $\varphi_p = \omega t_p < \frac{\pi}{2}$ (рис. 4.3) [108].

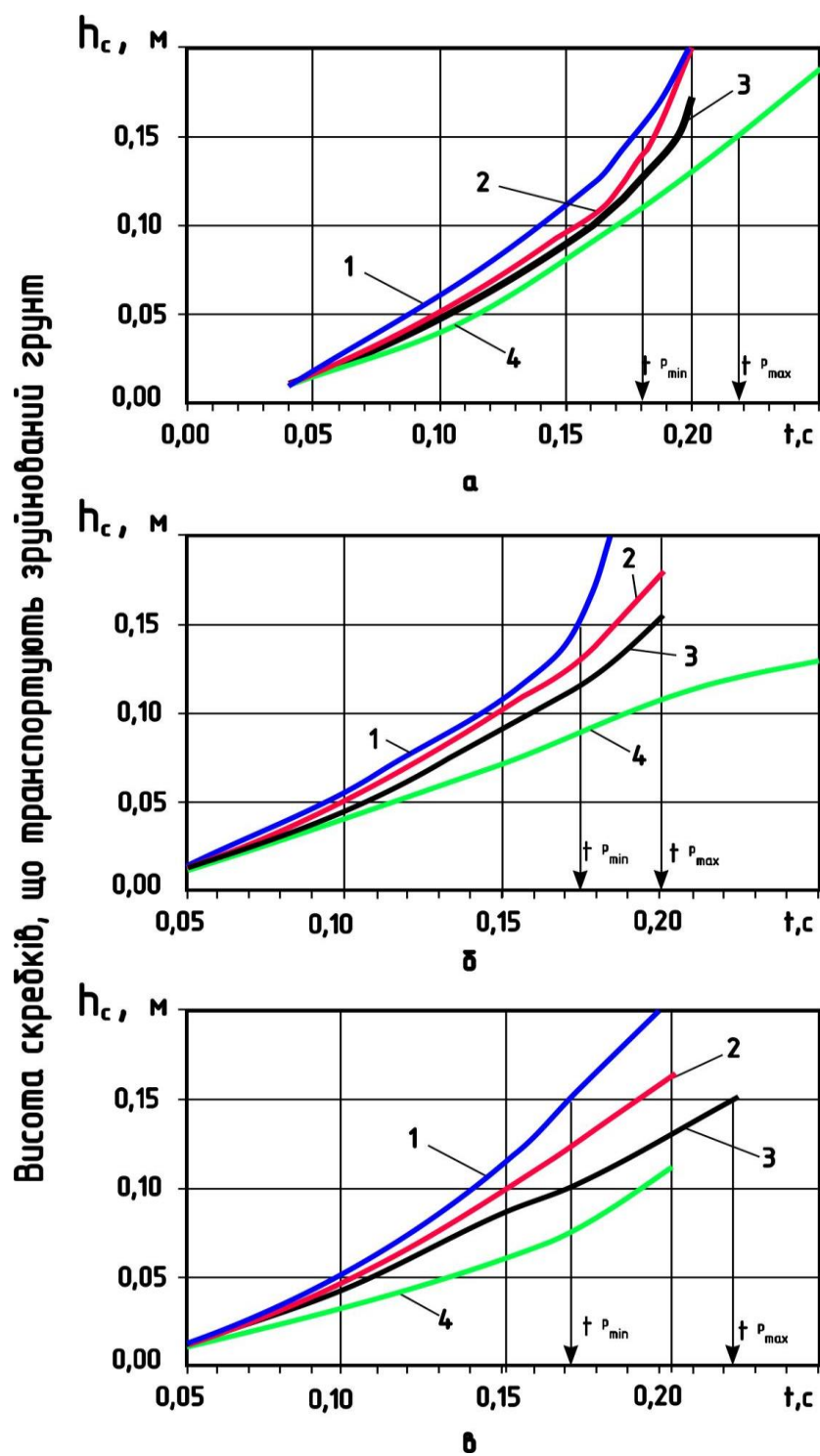
Умова розвантаження корегується кутовою швидкістю ω . У зв'язку з тим, що час розвантаження ґрунту залежить від висоти скребка та практично не залежить від кутової швидкості в межах її зміни $\omega = 5,0\text{--}9,0 \text{ с}^{-1}$ (див. рис. 4.3), максимальну кутову швидкість можна визначити як $\omega_{\text{max}} = \pi / 2t_p$.

Швидкість різання дорівнює

$$\vartheta_p = \frac{t_{\text{ланц.}}}{2 \sin \frac{180^\circ}{n_z}} \omega, \text{ м/с}, \quad (4.14)$$

де $t_{\text{ланц}}$ – крок ланцюга ($t_{\text{ланц}} = 0,1\text{--}0,2 \text{ м}$);

n_z – число зубів приводної зірочки ($n_z = 7\text{--}11$).



$$a - \omega = 5,0 \text{ c}^{-1}; \quad б - \omega = 7,0 \text{ c}^{-1}; \quad в - \omega = 9,0 \text{ c}^{-1};$$

$$1 - \mu_1 = 0,2; \quad 2 - \mu_1 = 0,3; \quad 3 - \mu_1 = 0,4; \quad 4 - \mu_1 = 0,6$$

Рисунок 4.3 – Залежності зміни шляху переміщення ґрунту по поверхні розвантажувальних скребків від часу розвантаження

12. Технічна продуктивність робочого органа за виносною здатністю для однієї групи різців

$$\Pi_{\text{техн}}^1 = 3600 \cdot B \cdot h_c \cdot v_p \cdot \frac{k_n}{k_p} \Delta_p, \text{ м}^3/\text{год}, \quad (4.15)$$

де k_n – коефіцієнт заповнення ґрунтом міжскребкових екскаваторних ємностей (для ґрунтів I–IV категорій відповідно 0,9–1,2 та 0,7–0,9) [8, 9];

Δ_p – коефіцієнт розтрішування ($\Delta_p = 0,97; 0,92; 0,85; 0,75$ відповідно для $v_p = 0,1; 1,0; 1,5; 2,0$) [106, 109].

Якщо в забої знаходиться $Z_{\text{гр}}^3$ різців

$$\Pi_{\text{техн}} = \Pi_{\text{техн}}^1 \cdot Z_{\text{гр}}^3, \text{ м}^3/\text{год}. \quad (4.16)$$

13. Робоча швидкість екскаватора дорівнює

$$v_e \leq \frac{\pi_{\text{техн}}}{3600BH}, \text{ м/с}. \quad (4.17)$$

14. Кут між векторами швидкостей подачі робочого органа v_e та різання ґрунту v_p (див. рис. 4.1) визначається за залежністю [109]

$$\beta = \arctg \left(\frac{v_p \sin \alpha}{v_p \cos \alpha + v_e} \right), \text{ град}, \quad (4.18)$$

де α – кут установлення робочого органа до горизонту ($\alpha = 30\text{--}55^\circ$, переважно $\alpha = 45\text{--}55^\circ$), град [2, 109].

У подальшому визначається:

15. Час різання ґрунторозробними органами (різцями, скребками)

$$t_p = \frac{H}{v_p \sin \beta}, \text{ с}. \quad (4.19)$$

16. Подача на кожний різець

$$S_1 = \frac{\vartheta_e \cdot t_p}{Z_{\text{гр}}^3} = \frac{\Pi_{\text{техн}}^1}{3600 B \vartheta_p \sin \beta} = \frac{h_{\text{кр}}}{\sin \beta}. \quad (4.20)$$

Звідки технічна продуктивність дорівнює

$$\Pi_{\text{техн}} = 3600 \cdot B \cdot h_{\text{кр}} \cdot \vartheta_p = \frac{3600 \cdot \vartheta_e \cdot B \cdot H}{Z_{\text{гр}}^3}. \quad (4.21)$$

17. Висота робочого органа над денною поверхнею H_0 визначається за умови, що довжина одного приводного ланцюга дорівнює трьом крокам між групами скребків

$$l_p = \frac{2(H + H_0)}{\sin \alpha} = 3T = \frac{3H}{\sin \beta}, \text{ м.} \quad (4.22)$$

Звідси, якщо прийняти $\alpha \approx \beta$, то

$$H_0 \approx \frac{H}{2}, \text{ м.} \quad (4.23)$$

18. Кількість груп різців для прийнятої умови $Z_{\text{гр}} = 3$.

19. Число різців, що одночасно розробляють ґрунт в умовах блокованого різання (для $Z_{\text{гр}}^3 = 1$):

якщо a_p визначається за залежністю (4.3),

$$n_{\text{бл}} = i_{\text{л}}^{\text{бл}}, \text{ шт.}$$

В подальшому визначається:

20. Кут зсуву ґрунту в поздовжній площині (у напрямку руху ґрунторозробних органів)

$$\psi = a_{\psi} + k_{\psi} \cdot \alpha_p, \text{ рад} \quad (4.25)$$

де a_ψ , k_ψ – коефіцієнти інтерполяції для сталого режиму різання, які залежать від типу ґрунту [77, 80, 105];

α_p – кут різання різця, рад.

21. Ширина крайніх бокових різців із умови рівності критичних глибин різання ґрунту крайніми та середніми різцями

$$(a' - n' \cdot \alpha_p) \cdot \epsilon'_p = \frac{a \cdot \epsilon_{\text{бл}}}{(\text{tg} \alpha_p)^n \cdot k_{\text{бок}}}, \quad (4.26)$$

Звідки

$$\epsilon'_p = \frac{a \cdot \epsilon_{\text{бл}}}{(\text{tg} \alpha_p)^n \cdot k_{\text{бок}} \cdot (a' - n' \cdot \alpha_p)}, \text{ м} \quad (4.27)$$

де a', n' – коефіцієнти апроксимації, що залежать від типу різання та ґрунту (див. табл. 4.1);

α_p – кут різання різця в градусах.

Таблиця 4.1 – Чисельні значення коефіцієнтів апроксимації a' , n'

Тип ґрунту \ Тип різання	Асиметричне блоковане	
	a'	n'
Тугопластична глина	4,02	0,046
Напівтверда глина	3,98	0,046
Напівтвердий суглинок	4,26	0,050
Твердий супісок	5,02	0,066

22. Довжина лемешів середніх різців, що здійснюють симетричне блоковане різання (без обмеження бокових розвалів)

$$l_L = \frac{l_c}{k_{\text{бок}}} = \frac{-B_* - \sqrt{B_*^2 - 4A_* \cdot C_*}}{2A_* \cdot k_{\text{бок}}}, \text{ м} \quad (4.28)$$

де

$$\begin{cases} A_* = -\sin^2 \alpha_p (\operatorname{ctg} \alpha_p + \operatorname{ctg} \psi) c \\ B_* = 2 \sin \alpha_p (\operatorname{ctg} \alpha_p + \operatorname{ctg} \psi) c \cdot h_{\text{кр}} - \frac{\sin(\alpha_p + \varphi + \varphi_0 + \psi)}{\cos \varphi \cdot \cos \varphi_0} b_p \cdot q_{\text{сеп}} \\ C_* = \frac{c \cdot h_{\text{кр}}}{\sin \psi} (b_p + \arcsin \left(\frac{\operatorname{tg} \psi}{\operatorname{tg} \gamma} \right) h_{\text{кр}} \cdot \operatorname{ctg} \psi); \end{cases} \quad (4.29)$$

для асиметричного блокованого різання крайніми боковими різцями

$$\begin{cases} A_* = \sin^2 \alpha_p \cdot (\operatorname{ctg} \alpha_p + \operatorname{ctg} \psi) \cdot \left(\frac{\xi \cdot q_{\text{сеп}} \cdot \operatorname{tg} \varphi_0}{2} - c \right) \\ B_* = 2 \sin \alpha_p (\operatorname{ctg} \alpha_p + \operatorname{ctg} \psi) \cdot c \cdot h_{\text{кр}} - \frac{\sin(\alpha_p + \varphi + \varphi_0 + \psi)}{\cos \varphi \cdot \cos \varphi_0} b'_p \cdot q_{\text{сеп}} \\ C_* = \frac{c \cdot h_{\text{кр}}}{\sin \psi} \cdot \left(b_p + \arcsin \left(\frac{\operatorname{tg} \psi}{\operatorname{tg} \gamma} \right) \cdot \frac{h_{\text{кр}}}{2} \cdot \operatorname{ctg} \psi \right); \end{cases} \quad (4.30)$$

ξ – коефіцієнт бічного тиску [5, с. 33].

Апроксимаційні залежності для визначення відносної довжини лемеша.

а) симетричне блоковане різання середніми різцями:

– для напівтвердого суглинку

$$\frac{l}{\epsilon_{\text{бл}}} = \frac{10830}{\alpha_p^{2,044}}; \quad (4.31)$$

– для напівтвердої глини

$$\frac{l}{\epsilon_{\text{бл}}} = 0,0213 \cdot \alpha_p^2 - 1,9785 \alpha_p + 49,435; \quad (4.32)$$

– для твердого супіску

$$\frac{l}{\epsilon_{\text{бл}}} = 0,0193 \cdot \alpha_p^2 - 1,7925 \alpha_p + 44,825; \quad (4.33)$$

б) асиметричне блоковане різання крайніми боковими різцями:

– для напівтвердих суглинку і глини

$$\frac{l}{e'_{a.бл}} = -0,063\alpha_p + 4,78; \quad (4.34)$$

– для твердого супіску

$$\frac{l}{e'_{a.бл}} = -0,0532\alpha_p + 3,5857 \quad (4.35)$$

де α_p – кут різання різців в град.

23. Середній тиск на лемеші різців

$$q_{сер} = (0,75 - 0,8) \cdot q_{кр}, \text{ МПа} \quad (4.36)$$

де $q_{кр}$ – критичний тиск на ґрунт по його несучій спроможності

$$q_{кр} = \left(\gamma_{гр} \cdot h_{кр} + \frac{c}{\text{tg}\varphi_0} \right) \text{tg}^4 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi_0}{2} \right), \text{ МПа} \quad (4.37)$$

де $\gamma_{гр}$ – питома сила тяжіння ґрунту, МН/м³

24. Сила блокованого (напівблокованого) різання одним різцем

$$P_1 = q_{сер} \cdot l_{бл.(н.бл)} \cdot b_{бл.(н.бл)} \cdot \sin \alpha_p (1 + f \text{ctg} \alpha_p), \text{ МН.} \quad (4.38)$$

25. Сумарна сила блокованого різання всіма різцями, якщо $Z_{гр}^3 = 1$

$$P_{\Sigma p} = (i_{л}^{бл} - 2) P_{1.бл} + 2P'_{бл} + P_{\Sigma \epsilon} = \\ = \left[(i_{л}^{бл} - 2) l_{бл} \cdot e_{бл} + 2l'_{a.бл} \cdot e'_{a.бл} \right] \cdot q_{сер} \cdot \sin \alpha_p (1 + f \text{ctg} \alpha_p) + P_{\Sigma \epsilon}, \text{ МН} \quad (4.39)$$

де $P'_{бл}$ – сила асиметричного блокованого різання крайнім боковим різцем;

$P_{\Sigma\epsilon}$ – сумарна сила вільного різання ґрунту, який залишився незруйнованим у фронтальній площині між різцями у вигляді трикутників з основою α_p і висотою $h_{кр}$ [107]

$$P_{\Sigma\epsilon} = \left[-(\sin \psi_\epsilon + \operatorname{tg} \varphi_0 \cdot \cos \psi_\epsilon) \frac{\cos(\alpha_p + \varphi + \psi_\epsilon)}{\cos \varphi \cdot \sin \alpha_p} \cdot q_0 + c \cdot \operatorname{ctg} \psi_\epsilon \right] \times \\ \times h_{кр}^2 \cdot \operatorname{ctg} \gamma \cdot (i_{л}^{6л} - 1), \text{ МН} \quad (4.40)$$

де

$$\psi_\epsilon = 90^\circ - \frac{\alpha_p + \varphi + \varphi_0}{2}, \text{ град} \quad (4.41)$$

q_0 – мінімальний нормальний тиск ґрунту на скребок при контакті з незруйнованими виступами трапеційдальної форми, які залишилися між ножами

$$q_0 = c \cdot (A_1 - 1) \operatorname{ctg} \varphi_0, \text{ МПа} \quad (4.42)$$

A_1 – коефіцієнт, який залежить від кута різання та кута внутрішнього тертя ґрунту, чисельні значення якого наведені в [110].

26. Сила опору транспортування зрізаного ґрунту по поверхні забою [34]

$$P_{тр} = \frac{B \cdot h_{кр} \cdot H \cdot \gamma_{гр}}{k_p \cdot \sin \beta} (1 + \operatorname{tg} \varphi_0 \cdot \operatorname{ctg} \alpha) \sin \alpha, \text{ МН} \quad (4.43)$$

де $\gamma_{гр}$ – питома сила тяжіння ґрунту, МН/м³;

k_p – коефіцієнт розпушення ґрунту ($k_p = 1,08$ – $1,32$ відповідно для ґрунтів I–IV категорії [2, 34]).

27. Сила натягу ланцюга, яка необхідна на підйом ґрунту з забою, дорівнює силі тяжіння цього ґрунту

$$P_{\text{під}} = B \cdot h_c \cdot \gamma_{\text{гр}} \left(\frac{H}{2} + H_0 \right) \frac{k_H}{k_p \cdot \sin \alpha}, \text{ МН}, \quad (4.44)$$

де h_c – висота скребка визначена відповідно до залежності (12);

k_H – коефіцієнт заповнення міжскребкового простору (для ґрунтів І–ІV категорій відповідно 0,9–1,2 та 0,7–0,9 [2, 34]).

28. Сумарне зусилля в ланцюгу

$$P_{\Sigma} = (P_{\Sigma P} + P_{\text{тр}} + P_{\text{під}}) \cdot Z_{\text{гр}}^3, \text{ МН}. \quad (4.45)$$

29. Енергоємність руйнування

$$E = \frac{P_{\Sigma}}{B h_{\text{кр}}}, \text{ МДж/м}^3. \quad (4.46)$$

30. Необхідний крутний момент для приводного вала

$$M_{\text{кр}} = 10^6 \cdot P_{\Sigma} \cdot R_{\text{зір}}, \text{ Нм} \quad (4.47)$$

де $R_{\text{зір}}$ – радіус приводної зірочки

$$R_{\text{зір}} = \frac{t_{\text{ланц}}}{2 \sin(180^\circ / n_z)}, \text{ м}. \quad (4.48)$$

31. Необхідна потужність двигуна на привід ланцюгово-скребкового робочого органа

$$N_{p.o.} = \frac{10^3 \cdot (P_{\Sigma P} + P_{\text{тр}} + P_{\text{під}}) \cdot Z_{\text{гр}}^3 \cdot v_p}{\eta_{\text{пр}} \cdot \eta_{\text{ланц}}}, \text{ кВт}, \quad (4.49)$$

де $\eta_{\text{пр}}$, $\eta_{\text{ланц}}$ – ККД привода та ланцюга ($\eta_{\text{пр}} = 0,7\text{--}0,75$; $\eta_{\text{ланц}} = 0,45\text{--}0,50$) [2, 109].

32. Баланс потужності двигуна та вибір базової машини здійснюється відповідно до літератури [2, 34, 106, 109].

33. Якщо задана потужність двигуна $N_{\text{дв}}$, то можна визначити $Z_{\text{гр}}^3$ із балансу потужності

$$\frac{10^3 \cdot (P_{\Sigma P} + P_{\text{тр}} + P_{\text{під}}) \cdot Z_{\text{гр}}^3 \cdot v_p + N_{\text{шн}}}{\eta_{\text{пр}} \cdot \eta_{\text{ланц}}} + N_{\text{пер}} = N_{\text{дв}}, \text{ кВт}, \quad (4.50)$$

де $N_{\text{шн}}$, $N_{\text{пер}}$ – потужності на привід транспортувальних шнеків і переміщення машини визначаються відповідно до літератури [2, 34, 106, 109].

Отримана інженерна методика розрахунку ланцюгових екскаваторів, які працюють в режимі критичноглибинного блокованого різання ґрунту, наведена в [111].

4.2. Економічне обґрунтування практичного впровадження ланцюгових траншейних екскаваторів безперервної дії з критичноглибинним різанням ґрунту

4.2.1 Вихідні дані для розрахунку трудових та грошових затрат

Для оцінки економічної ефективності від модернізації робочого обладнання за результатами досліджень до розгляду прийнятий ланцюговий екскаватор ЕТЦ-165, який побудований на базі трактора МТЗ-82.1. Технічна характеристика та ціна базової машини і робочого обладнання прийняті з інформаційних ресурсів [112- 114] та наведені в табл. 4.2.

Усі грошові витрати, пов'язані з експлуатацією машини, зазвичай розраховуються на одиницю часу – годину роботи машини. Вартість машино-години – це грошовий вираз затрат на підготовку машини до роботи, підтримання в робочому стані та на її експлуатацію.

Таблиця 4.2 – Технічна характеристика машини

№	Показники	Одиниці виміру	Значення
1	Марка машини	—	ЕТЦ-165
2	Маса машини	кг	5800
3	Потужність двигуна	кВт (к.с.)	120
4	Ширина траншеї	м	0,2; 0,27; 0,4
5	Годинна технічна продуктивність	м ³ /год	85
6	Число годин роботи в рік	год	2000
7	Оптово-відпускна ціна	грн	802000
8	Обслуговувальний персонал	осіб	1

Собівартість однієї години роботи машини $S_{\text{м-год}}$ складається з:

- а) прямих витрат – $C_{\text{п.з.}}$;
- б) накладних витрат – $C_{\text{н.в.}}$.

4.2.2. Визначення прямих витрат

Прямі витрати складаються з трьох груп:

$$C_{\text{п.з.}} = E_{\text{од.}} + A_{\text{год.}} + C_{\text{пот.е.}} \quad (4.51)$$

Одночасні витрати $E_{\text{од}}$ включають: витрати на доставку машини з однієї ділянки на іншу, на її монтаж і демонтаж. Визначені за вибіркою з сайтів вантажних перевезень з урахуванням переміщення екскаватора на вантажній платформі SHMITZ з Харкова до Змієво станом на 24 листопада 2020 року [115]

$$E_{\text{од.}} = 5400 / 2000 = 2,7 \text{ грн.}$$

Річні витрати $A_{\text{пов}}$ – це річні амортизаційні відрахування на машину і додаткове обладнання (під'їзні дороги, фундаменти). Вони визначаються за формулою:

$$A_{\text{пов}} = C_{\text{i-р}} \cdot N_{\text{а}} / 100, \text{ грн/рік} \quad (4.52)$$

де $A_{\text{пов}}$ – повна сума амортизаційних відрахувань в рік, грн/рік;

$\Pi_{i.p}$ – інвентарно-розрахункова ціна машини грн.

$$\Pi_{i.p} = \Pi_{o.b} \cdot K_{т.з.} = 802000,0 \cdot 1,07 = 858140,0 \text{ грн} \quad (4.53)$$

де $\Pi_{o.b}$ – оптово-відпускна ціна машини, $\Pi_{o.b.} = 802000,0$ грн;

$K_{т.з.}=1,07$ – коефіцієнт транспортно-заготівельних витрат, зокрема 7% від оптово-відпускної ціни машини;

$H_a = 17,7\%$ – загальна норма амортизаційних відрахувань конкретно для кожної машини в %.

$$A_{пов} = 858140,0 \cdot 17,7 / 100 = 151890,78 \text{ грн / рік.}$$

В розрахунку на одну годину роботи машини амортизаційні відрахування будуть складати:

$$A_{год} = A_{пов} / t_{год} = 151890,78 / 2000 = 75,95 \text{ грн} \quad (4.54)$$

де $t_{год} = 2000$ год – річний час роботи машини.

Поточні експлуатаційні витрати $C_{пот.е.}$ включають:

- а) витрати на ТО і Р машини $C_{то р}$;
- б) витрати на допоміжні матеріали $C_{доп. м}$;
- в) витрати на зарплату робітників, зайнятих управлінням машини $З_{заг}$;
- г) витрати на паливо $C_{пал.}$

Поточні експлуатаційні витрати за годину роботи машини визначаються за формулою:

$$C_{пот.е} = C_{то р} + З_{заг} + C_{пал} + C_{доп.м}, \text{ грн.}, \quad (4.55)$$

де $C_{то р}$ – сума витрат на ТО і Р в розрахунку на одну годину роботи машини. Вони беруться із збірника доповнень і поправок до кошторисних норм СНіП IV-3-82. $C_{то р} = 48,0$ грн [115].

З цього доповнення приймаємо і зарплата на ТО і Р $З_{то р} = 8,4$ грн.

$З_{заг}$ – загальна годинна заробітна плата робітників, що обслуговують машину при експлуатації, визначається за формулою:

$$З_{\text{заг}} = З_{\text{осн}} + З_{\text{дод}} + З_{\text{нар}} = 75,0 + 18,75 + 4,13 = 97,88 \text{ грн}, \quad (4.56)$$

де $З_{\text{осн}} = 75,0$ грн – основна годинна заробітна плата робітників в залежності від їх розряду;

$З_{\text{дод}}$ – додаткова зарплата, грн.

Приймаємо в розмірі 25% від основної:

$$З_{\text{дод}} = 0,25 \cdot З_{\text{осн}} = 0,25 \cdot 75,0 = 18,75 \text{ грн} \quad (4.57)$$

де $З_{\text{нар}}$ – нарахування на зарплату щодо соціального страхування приймаємо 4,4% від основної і додаткової зарплат разом узятих:

$$З_{\text{нар}} = 0,044 (З_{\text{осн}} + З_{\text{дод}}) = 0,044 \cdot (75,0 + 18,75) = 4,13 \text{ грн}; \quad (4.58)$$

$$С_{\text{пал}} = W_{\text{год}} \cdot Ц_{\text{пал}}, \text{ грн} \quad (4.59)$$

де $С_{\text{пал}}$ – витрати на паливо або електроенергію в грн на одну годину роботи машини;

$W_{\text{год}}$ – годинні витрати палива, кг/к.с.;

$Ц_{\text{пал}}$ – ціна 1 кг палива (дизельного 31,58 грн, станом на 24 листопада 2018 року, [116]).

Годинні витрати палива для ДВЗ знаходяться за формулою:

$$W_{\text{год}} = N_{\text{дв}} \cdot K_{\text{дв}} \cdot [K_{\text{д.п.}} \cdot (q_{\text{н}} - q_{\text{х}}) + q_{\text{х}}], \text{ кг} \quad (4.60)$$

де $N_{\text{дв}}$ – номінальна потужність двигуна, к.с., $N_{\text{дв}} = 120$ к.с.;

$K_{\text{дв}}$ – коефіцієнт використання двигуна в часі, $K_{\text{дв}} = 0,75$;

$K_{\text{д.п.}}$ – коефіцієнт використання двигуна по потужності, $K_{\text{д.п.}} = 0,5$;

$q_{\text{х}}$ – витрати палива на 1 к.с. номінальної потужності за годину при холостому ході, $q_{\text{х}} = 0,16$ кг;

$q_{\text{н}}$ – те ж, при завантаженні двигуна, $q_{\text{н}} = 0,27$ кг

$$W_{\text{год}} = 120 \cdot 0,75 \cdot (0,5 \cdot (0,27 - 0,16) + 0,16) = 19,35 \text{ кг}$$

$$С_{\text{пал}} = 19,35 \cdot 31,58 = 407,38 \text{ грн}$$

$C_{\text{доп.м}}$ – вартість допоміжних матеріалів, грн (обтирального матеріалу, пускового бензину та ін.).

Приймаються 35% від вартості основного палива.

$$\begin{aligned} C_{\text{доп.м}} &= 0,35 \cdot 407,38 = 142,58 \text{ грн;} \\ C_{\text{пот.е}} &= C_{\text{тор}} + Z_{\text{заг}} + C_{\text{пал}} + C_{\text{доп.м}}, \text{ грн} \\ C_{\text{пот.е}} &= 48 + 97,88 + 407,38 + 142,58 = 695,84 \text{ грн.} \end{aligned} \quad (4.61)$$

Тоді прямі витрати на годину роботи машини рівні:

$$\begin{aligned} C_{\text{пр.з}} &= E_{\text{од}} + A_{\text{год}} + C_{\text{пот.е}} = \\ &= 2,7 + 5,95 + 695,84 = 774,49 \text{ грн/м-год.} \end{aligned}$$

В тому числі заробітна плата в прямих затратах рівна:

$$\begin{aligned} Z_{\text{пр.з}} &= Z_{\text{одн.г}} + Z_{\text{заг.г}} + Z_{\text{тор.г}}, \text{ грн./м-год;} \\ Z_{\text{пр.з}} &= 75,0 + 97,88 + 8,4 = 181,28 \text{ грн./м-год.} \end{aligned} \quad (4.62)$$

4.2.3. Визначення накладних витрат

До накладних $C_{\text{н.в}}$ витрат відносяться:

- відрахування на утримання вищих організацій;
- витрата на утримання адміністрації, госпперсоналу;
- витрати на охорону праці і техніку безпеки;
- витрати на культурно-побутові цілі і на раціоналізацію;
- витрати на утримання ремонтних майстерень;
- витрати на збереження і обслуговування машин в неробочий час.

Сума накладних витрат для будівельних і дорожніх машин визначається в розмірі 30 % від загальної зарплати в прямих витратах і 10 % від суми інших витрат за винятком зарплати (СНіП, вип. 1984 р.).

$$\begin{aligned} C_{\text{н.в}} &= 0,3 \cdot Z_{\text{пр.з}} + 0,1 \cdot (C_{\text{пр.з}} - Z_{\text{пр.з}}), \text{ грн/м-год} \\ C_{\text{н.в}} &= 0,3 \cdot 181,28 + 0,1 \cdot (774,49 - 181,28) = 113,7 \text{ грн/м-год.} \end{aligned} \quad (4.63)$$

Тоді собівартість машино-години складе:

$$S_{\text{м-год}} = C_{\text{пр.з}} + C_{\text{н.в}} = 774,49 + 113,7 = 888,19 \text{ грн/м-год.} \quad (4.64)$$

4.2.4. Визначення собівартості одиниці механізованих робіт

Собівартість одиниці роботи визначається за порівнювальними машинами шляхом ділення собівартості машино-години на середньогодинну експлуатаційну продуктивність машини

$$S_{\text{од.роб}} = S_{\text{м-год}} / \Pi_{\text{е.год}}, \text{ грн / шт. ,} \quad (4.65)$$

де $S_{\text{м-год}}$ – кошторисна собівартість машино-години, грн;

$\Pi_{\text{е.сер.год}}$ – середньогодинна експлуатаційна продуктивність машини, $\text{м}^3/\text{год}$

$$\Pi_{\text{е.сер.год}} = \Pi_{\text{т.год}} \cdot K_{\text{в}}, \text{ м}^3/\text{год}; \quad (4.66)$$

$$\Pi_{\text{е.год}} = \Pi_{\text{е.сер.год}} \cdot K_{\text{т.е}}, \text{ м}^3/\text{год} , \quad (4.67)$$

де $\Pi_{\text{т.год}} = 120 \text{ м}^3/\text{год}$;

$K_{\text{т.е.}} = 0,5$ – коефіцієнт переходу від технічної продуктивності до експлуатаційної [117];

$K_{\text{в}} = 0,75$ – коефіцієнт використання машини за часом [117].

$$\Pi_{\text{е.сер.год}} = 120 \cdot 0,75 = 90 \text{ м}^3/\text{год}$$

$$\Pi_{\text{е.год}} = 90 \cdot 0,5 = 45 \text{ м}^3/\text{год.}$$

Собівартість роботи при різанні і переміщенні ґрунту :

$$S_{\text{од.роб}} = 888,19 / 45 = 19,74 \text{ грн/м}^3.$$

Всі розрахунки щодо кошторисної собівартості зведемо в табл. 4.3.

За результатами розрахунків методики, які приведені в другому розділі, вдалось збільшити продуктивність машини до $175 \text{ м}^3/\text{год}$ (див. рис. 2.9, для

ширини траншеї 0,28 м), у порівнянні з базовою машиною, продуктивність якої складає 120 м³/год.

Таблиця 4.3 – Кошторисна калькуляція собівартості машино-години, грн

№ з/п	Статті затрат	Позначення	На машино-годину
1.	Одночасні витрати	Е _{од.}	2,7
2.	Річні витрати (амортиз. на 1год роб. маш.)	А _{год}	75,95
3.	Поточні експлуатаційні витрати в т.ч.:	С _{пот.е}	695,84
	а) зарплата основна;	З _{осн}	75,0
	б) зарплата додаткова;	З _{дод}	18,75
	в) нарахування на зарплату	З _{нар}	4,13
	Всього зарплата з нарахуваннями:	З _{заг}	97,88
	г) ТО і поточний ремонт в т.ч. зарплата;	С _{то р} /З _{тор}	48,0/8,4
	д) паливо й енергія;	С _{пал}	407,38
	е) допоміжні й мастильні матеріали;	С _{доп.м}	142,58
	Всього прямих витрат	С _{пр.з}	774,49
	в т.ч. зарплата в прямих витратах	З _{пр.з}	181,28
4.	Накладні витрати		
	а) 30% від суми зарплати		29,36
	б) 10% від суми прямих витрат за викл. зарплати		59,32
5.	Всього накладних витрат	С _{н.в}	113,7
	Кошторисна собівартість машино-години	С _{м-год}	888,19

Таким чином, вдалось знизити собівартість розробки одного кубічного метра ґрунту та підвищити продуктивність екскаватора на:

$$S_{\text{од.роб}} = S_{\text{м-год}} / П_{\text{е.год}} = 888,19 / 65,62 = 13,53 \text{ грн/м}^3;$$

$$П_{\text{е.сер.год}} = П_{\text{т.год}} \cdot K_{\text{в}} = 175 \cdot 0,75 = 131,25 \text{ м}^3/\text{год};$$

$$П_{\text{е.год}} = П_{\text{е.сер.год}} K_{\text{т.е}} = 131,25 \cdot 0,5 = 65,62 \text{ м}^3/\text{год}.$$

За результатами економічних розрахунків отримано, що собівартість роботи модернізованого траншейного екскаватора ЕТЦ-165 складатиме 888,19 грн за годину. Початкова собівартість розробки 1 м³ ґрунту машиною складає

19,74 грн, а цей же показник для модернізованої машини складе 13,53 грн/м³. Таким чином, вдалось знизити собівартість одиниці механізованих робіт на 6,21 грн, або ж на 31,44 %.

Висновок за розділом 4

1. Розроблено методики розрахунку параметрів ланцюгово-скребкових траншейних екскаваторів на основі критичноглибинного різання ґрунтів його різцями(зубами) та скребками (балками), які дозволяють визначити:

– геометричні параметри робочого інструменту та їх розміщення (ширина центральних та крайніх бокових різців, критична глибина різання, довжина лемешів, кут нахилу бокових розширень, відстань між суміжними ґрунторозробними органами, число ліній різання, крок встановлення балок, кількість груп різців в забої, висота скребків),

– силові та енергетичні показники (сила блокованого різання одним різцем, сумарна сила блокованого різання всіма різцями, сила опору транспортування зрізаного ґрунту по поверхні забою, сила натягу ланцюга, сумарне зусилля в ланцюгу, енергоємність руйнування, крутний момент для приводного вала, необхідна потужність двигуна на привід, баланс потужності двигуна та вибір базової машини);

– експлуатаційні характеристики екскаватора (швидкість різання ґрунту, технічна продуктивність, робоча швидкість екскаватора).

2. Методика розрахунку параметрів ланцюгово-скребкових траншейних екскаваторів на основі критичноглибинного різання ґрунтів впроваджені на ТОВ «Харківспецбуд-1», на ТОВ НВП «Газтехніка ЛТД», а також у навчальному процесі для підготовки бакалаврів за спеціальністю 133 «Галузеве машинобудування» у Харківському національному автомобільно-дорожньому університеті при викладанні курсу «Машини для земляних робіт».

3. Розрахунками економічної ефективності встановлено, що зниження собівартості одиниці механізованих робіт від модернізації ланцюгово-скребкового траншейного екскаватора ЕТЦ-165 шляхом установлення різців та скребоків, які працюють в режимі критичноглибинного блокованого різання ґрунтів, на 31,44%.

Основні положення цього розділу викладені в публікації №111.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. З аналізу науково-технічних літературних джерел, а також досвіду експлуатації ЗТМ встановлено, що розробка ґрунту ланцюговими багатоскребковими траншейними екскаваторами проводиться за найбільш універсальною сумісною схемою з плоскими транспортувальними скребками, на яких у певному порядку закріплені клиноподібні різці (зуби).

Відомі аналітично-експериментальні моделі взаємодії багатоскребкових ланцюгових траншейних екскаваторів з ґрунтом не визначають параметри і режими їх роботи на основі критичноглибинного різання ґрунтів, а тому не забезпечують мінімальну питому енергоємність і максимальну продуктивність робочого процесу.

Наявні математичні моделі для визначення критичної глибини різання розроблені для блокованого, напівблокованого та комбінованого різання, що здійснюють середні різці ланцюгових траншейних екскаваторів. Крайні бокові різці працюють в умовах блокування різця з одного боку вертикальною стінкою траншеї, а з іншого боку ґрунтом, що руйнується з можливістю вільного виходу на денну поверхню. Несиметричне блокування крайніх бокових різців не дозволяє визначити їх критичну глибину різання та довжину лемеша різців за відомими моделями. Не визначені ці параметри для крайніх різців також і для напівблокованого різання.

2. Уперше визначені основні параметри робочого органа та режими роботи екскаватора, який працює в критичноглибинному різанні ґрунту, а саме:

– вперше визначена відносна критична глибина асиметричного блокованого різання ґрунтів крайніми боковими різцями, яка при зменшенні кута різання різця від 50° до 20° збільшується за лінійною залежністю від кута різання відповідно: для тугопластичної та напівтвердої глини від 1,71 до 3,12 відносно ширини різця; для напівтвердого суглинку від 1,76 до 3,27 та для твердого супіску від 1,78 до 3,75 відповідно;

– із умови рівності критичних глибин симетричного та асиметричного блокованого різання визначена ширина крайніх бокових різців, яка більша за ширину середніх різців, наприклад, для напівтвердого суглинку в

– відносна довжина лемешів зменшується за лінійною залежністю при збільшенні кута різання різців від 20° до 50° для асиметричного блокованого різання від 3,52 до 1,63 для напівтвердих суглинку та глини та від 2,52 до 0,93 для твердого супіску; для симетричного блокованого різання зменшується за квадратно-параболічною залежністю від 8,5 до 3,4 для напівтвердого суглинку, від 10,2 до 3,7 для твердого супіску, від 7,7 до 3,2 для напівтвердої глини при збільшенні кута різання від 30° до 50° ;

– число ліній блокованого різання прямо пропорційно збільшується з шириною траншеї, а висота скребків залежить від ширини різців, кількості їх на балці, їх кута різання, фізико-механічних властивостей ґрунтів та ширини траншеї;

– максимальна швидкість різання різців залежить у першу чергу від висоти скребків і коефіцієнтів зовнішнього тертя ґрунту та змінюється, наприклад, для напівтвердого суглинку в межах: для ширини середніх різців 0,02 м від 2,16 до 2,56 м/с; для ширини середніх різців 0,03 м від 1,69 до 1,82 м/с. При цьому технічна продуктивність збільшується відповідно з 91,3 до 171,2 м³/год та з 175,2 до 320 м³/год залежно від ширини траншеї, а робоча швидкість екскаватора змінюється в межах від 0,064 до 0,095 м/с для ширини різців 0,02 м і від 0,097 до 0,133 м/с для ширини різців 0,03 м;

– сумарні сили різання та копання прямо пропорційно збільшуються з шириною траншеї для кутів різання $20\text{--}50^\circ$. Із зменшенням кута різання критичноглибинна сила різання зростає у зв'язку зі збільшенням критичної глибини та подачі на різець;

– енергоємність робочого процесу мінімальні значення приймає при кутах різання $\alpha_p = 20\text{--}30^\circ$ та прямо пропорційно зростає із збільшенням ширини траншеї, а при кутах різання різців $\alpha_p = 40\text{--}50^\circ$ стабілізується та

практично не залежить від ширини траншеї. Енергоємність, наприклад, для напівтвердого суглинку (грунт II категорії) змінюється від 147, 7 кДж/м³ для $\alpha_p = 20^\circ$ до 225,8 кДж/м³ для $\alpha_p = 50^\circ$, що менше в 1,5–2,5 раза значень енергоємності, що визначені іншими авторами для ґрунтів II категорії та традиційних режимів роботи ланцюгових багатоскребкових траншеєкопачів;

– енергомісткість (відношення енергоємності до продуктивності) для напівтвердого суглинку зменшується зі збільшенням ширини різців від 0,02 м до 0,03 м з 0,22–0,39 кВт·год/м³ до 0,20–0,22 кВт·год/м³.

Розроблені методики експериментального визначення відносної критичної глибини асиметричного блокованого різання та відносної довжини лемеша на критичній глибині різання. Проведені дослідження підтверджують достовірність отриманих математичних моделей і прийнятих припущень у розрахункових схемах. Розходження між експериментальними даними та розрахунковими значеннями не перевищують 11–12%.

На підставі проведених в дисертації досліджень створено методики розрахунку параметрів ланцюгово-скребкових траншейних екскаваторів на основі критичноглибинного різання ґрунтів його різцями (зубами) та скребками (балками). Отримані розрахунки охоплюють:

– геометричні параметри робочого інструменту та їх розміщення (ширина центральних та крайніх бокових різців, критична глибина різання, довжина лемешів, кут нахилу бокових розширень, відстань між суміжними ґрунторозробними органами, число ліній різання, крок встановлення балок, кількість груп різців в забої, висота скребків);

– силові розрахунки та енергетичні (сила блокованого (напівблокованого) різання одним різцем, сумарна сила блокованого різання всіма різцями, сила опору транспортування зрізаного ґрунту по поверхні забою, сила натягу ланцюга, сумарне зусилля в ланцюгу, енергоємність руйнування, крутний момент для приводного вала, необхідна потужність двигуна на привід, баланс потужності двигуна та вибір базової машини);

– експлуатаційні характеристики екскаватора (швидкість різання ґрунту, технічна продуктивність, робоча швидкість екскаватора).

5. Методика розрахунку параметрів ланцюгово-скребкових траншейних екскаваторів на основі критичноглибинного різання ґрунтів впроваджені на ТОВ «Харківспецбуд-1», на ТОВ НВП «Газтехніка ЛТД», а також у навчальному процесі для підготовки бакалаврів за спеціальністю 133 «Галузеве машинобудування» у Харківському національному автомобільно-дорожньому університеті під час викладання курсу «Машини для земляних робіт».

6. Розрахунками економічної ефективності підтверджено зниження собівартості одиниці механізованих робіт від модернізації ланцюгово-скребкового траншейного екскаватора ЕТЦ-165 шляхом установлення різців та скребоків, які працюють у режимі критичноглибинного різання ґрунтів, на 31,44%.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Домбровский Н. Г. Многоковшовые экскаваторы. Констр., теория и расчет. М.: Машиностроение, 1972. 432 с.
2. Мусійко В.Д. Экскаватори поздовжнього копання: навч. посібник. К.: НТУ, ЗАТ «Віпол», 2008. 240 с.
3. АО «ЕТ Мыйзакюла» (ранее Мыйзакюласский экскаваторный завод ПО «Талэкс»): Все модели. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.etm.ee/accessory.ru.html>. Заг. з екрана.
4. Строительные машины и механизмы. Выкса: ОАО «Дробмаш», 2004. [Электронный ресурс]: Траншейные экскаваторы. Режим доступа <http://www.smm-pg.com/prodmorel>. Заг. з екрана.
5. Новоселов В. Возможны варианты. Новые модели траншейных экскаваторов. *Специальная техника и технологии*. 2005. №5. С. 60–66.
6. «Универсал сервис» - официальный представитель компании CASE в Украине. [Электронный ресурс]: Треншекопатели. Електронні дані. Режим доступа: <http://case.maibud.com/transh.shtml>. Заг.з екрана.
7. Astek Industries, Ins [Электронный ресурс]. Режим доступа <http://www.astecindustries.com/>. Заг.з екрана.
8. Breakthrough Solutions [Электронный ресурс]: Astec Trenchers & Plows. Loundon TN USA: Astek Indusnries, Ins., 2005. Режим доступа <http://www.americanaugers.com/www/docs/101.31/>. Заг.з екрана.
9. Tesmec Group – Trenchers.files. 2007. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://tesmec.8080.it/Sito/Products/Trenchers>. Заг.з екрана.
10. DitchWitch. 2007. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.ditchwitch.com/>. Заг.з екрана.
11. Breakthrough Solutions [Электронный ресурс]. Trencor Full Product Line. Loundon TN USA: Astek Indusnries, Ins., 2005. Режим доступа http://www.trencor.com/www/docs/137/trencor_products.html.

12. Суриков В.В. Режущие элементы цепных скребковых рабочих органов – траншеекопателей. *Механизация строительства*. 1970. № 5. С. 22–24.

13. Буянов Г.Ф., Ивашков И.И., Пустынский Ф.Н. Цепной рабочий орган траншейных экскаваторов. *Механизация строительства*. 1978. №4. С. 11–13.

14. Соколов Л.К., Данилов А.К., Данилевский А.Г. Испытание сменного оборудования экскаватора ЭТЦ-165А. *Механизация строительства*. 1988. №4. С. 8–9.

15. Соколов Л.К., Данилов В.К., Данилевский А.Г. Рабочие органы и специальное оборудование к траншейным экскаваторам для разработки мерзлых грунтов. *Строительные и дорожные машины*. 1990. №8. С. 17–19.

16. Соколов Л.К., Герцог Е.В. Траншейное оборудование и режущий инструмент для разработки мерзлых грунтов. *Строительные и дорожные машины*. 1995. №12. С. 7–9.

17. Гусев А.И., Фиглин И.З., Румянцев В.А. Экскаватор траншейный цепной ЭТЦ-252. *Строительные и дорожные машины*. 1975. № 6. С. 10-11.

18. Лебедев М.Н., Джангулян Э.А. Экскаваторы со скребковыми рабочими органами для рытья узких траншей. *Механизация строительства*. 1965. № 12. С. 11–13.

19. Номенклатура экскаваторов непрерывного действия, серийно выпускаемых заводами Минстройдормаша. *Строительные и дорожные машины*. 1984. №12. С. 15–17.

20. Щербаков С.Г. Гусеничный экскаватор ЭТЦ-205 Дмитровского экскаваторного завода. *Механизация строительства*. 2007. №11. С. 29–31.

21. Бреева С.В. Траншейные экскаваторы для разработки мерзлых грунтов. *Строительные и дорожные машины*. 2007. № 6. С. 44–46.

22. Траншейный цепной экскаватор ЭТЦ-250 для строительства трубопроводов. *Оборудование. Инструменты*. 2007. №20. С. 66.

23. Малютин Л. Траншейные экскаваторы: технология и оборудование. Основные средства. *Строительные и дорожные машины*. 2002. № 2. С. 1–5.

24. Марк Э.А., Экс В.В. Траншейный цепной экскаватор ЭТЦ' 165А. *Строительные и дорожные машины*. 1985. № 7. С. 15–16.
25. Селиванов Б.С., Шкневский Э.Н. Траншейный цепной экскаватор ЭТЦ-165. *Строительные и дорожные машины*. 1975. № 6. С. 9.
26. Машины для земляних робіт: підручник / Л. А. Хмара, С. В. Кравець, М.П. Скоблюк та ін.; за заг. ред. д. т. н., проф. Л. А. Хмари та д.т.н., проф. С.В. Кравця. Х.: ХНАДУ, 2014. 548 с.
27. Строительные машины для механизации гидромелиоративных работ / В. В. Суриков, Б. А. Васильев, В. Б. Гантман и др.; под ред. В.В. Сурикова. М.: Агропромиздат, 1991. 463 с.
28. Машины для водного господарства: підручник / С.В. Кравець, В.С. Зінь, О. В. Маркова та ін. Рівне: НУВГП, 2008. 348 с.
29. Vermeer. [Electronic Resource]. Mode of access: URL: www2.vermeer.com/vermeer/EM/ru/Y/. - Screen title.
30. Trencor Roadminer [Electronic Resource]. Mode of access: URL: [http://www.undergroundconstructionmagazine.com/track-trenchers-rock-saws-trencorastec-tl 760](http://www.undergroundconstructionmagazine.com/track-trenchers-rock-saws-trencorastec-tl-760). - Screen title.
31. Cleveland Trencher Models [Electronic Resource]. Mode of access: URL: <http://www.cleveland-trencher.com>. – Screen title.
32. Быков А.В. Исследование конструктивно-кинематических параметров цепнобалочного рабочего органа универсальной землеройной машины: дис. ... канд. тех. наук. К., 1986. – 205 с.
33. Школьный А.Н. Обоснование выбора конструктивных и технологических параметров исполнительного органа бесковшовых цепных траншеекопателей: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.05.04. Томск, 2006. 23 с.
34. Мусійко В.Д. Теорія та створення інноваційних землерійних машин безперервної дії: монографія К: НТУ, СПД Чалчинська Н.В., 2016. 208 с.

35. Летопольский А.Б. Выбор и обоснование конструктивных параметров режущих рабочих органов траншейного цепного экскаватора: дис. канд. техн. наук / Летопольский Антон Борисович. – Омск, 2011. – 160 с.
36. Ветров Ю.А. Резание грунтов землеройными машинами. М.: Машиностроение, 1971. 360 с.
37. Машины для земляних робіт : навчальний посібник / Л.А. Хмара, С.В. Кравець, В.В. Нічке та ін.; під загальною редакцією проф. Л.А. Хмари та проф. С.В. Кравця. Рівне-Дніпропетровськ. Х., 2010. 557 с.
38. Румянцев В.А., Фиглин И.З. Траншейные экскаваторы. М.: Машиностроение, 1980. 102 с.
39. Вайнсон А.А. Исследование статистических и динамических нагрузок рабочего органа многоковшового траншеекопателя. *Сборник трудов МИСИ*. 1967. № 31. С. 37–42.
40. Землеройные машины непрерывного действия / З.Е. Гарбузов, В.К. Ильгисонис, Г.А. Мутушев и др. М.-Л.: Машиностроение, 1965. 276 с.
41. Фрейнкман И.Е., Ильгисонис В.К. Землеройные машины. Л.: Машиностроение, 1972. 320 с.
42. Домбровский Н.Г., Ципурский И.Л. Удельное усилие копания, развиваемое цепными траншейными экскаваторами. *Известия вузов*. 1970. №1. С. 15–17.
43. Баладинский В.Л. Динамическое разрушение грунтов. К.: КГУ, 1971. 226 с.
44. Сукач М.К. Синтез землерийної і дорожньої техніки: підручник; за ред. д.т.н., проф. М.К. Сукача. К.: Видавництво Ліра-К, 2013. 376 с.
45. Родин И.И., Соколов Л.К. Основы проектирования экскаваторов непрерывного действия: учебное пособие. Красноярск: Изд-во Краснояр. ун-та, 1987. 224 с.
46. Гумбург Г.В. Исследование основных процессов при узкотраншейном строительстве закрытого дренажа в зоне осушения: автореф. дис. канд. техн. наук / Г.В. Гумбург – Москва, 1973. – 15 с.

47. Джангулян Э.А. Исследование скребковых рабочих органов траншейных экскаваторов: автореф. дис... канд. техн. наук / Э.А. Джангулян. Ленинград: ЛИСИ, 1966. – 20 с.

48. Джангулян Э.А. Сопротивление грунтов резанию скребковыми рабочими органами траншейных экскаваторов. *Строительные и дорожные машины*. 1967. № 9.

49. Зедгенизов В.Г. Теоретические основы создания машин для прокладки гибких подземных коммуникаций: дис.... докт.техн.наук. – Иркутск: ИрГТУ, 2004. – 232 с.

50. Ковалев В.И. Исследование и оптимизация рабочих параметров цепного скребкового исполнительного органа узкотраншейных экскаваторов: автореф. дис... канд. техн. наук / В.И. Ковалев – М., 1980. – 19 с.

51. Кузьмінець М. П. Формування комплексу спеціальних землерийних машин для роботи в умовах діючих магістральних трубопроводів: дис. докт.техн.наук, - К., 2013. – 310 с. механизированные технологии строительства закрытого горизонтального дренажа в зоне орошения узкотраншейным способом: дис. д-ра техн. наук-Новочеркасск.

52. Стрельников А.Н. Определение рациональных режимов работы траншейных цепных экскаваторов со скребковым рабочим органом: дис... канд. техн. наук. – Иркутск, 2003. – 107.

53. Суриков В.В. Исследование дренажных траншеекопателей с цепным- скребковым рабочим; органом: автореф. дис. ... канд. техн. наук / В.В. Суриков - М., 1966: - 19 с.

54. Токарев Б.Н. Исследование транспортирующей способности цепно-скребковых рабочих органов универсальных землеройных машин с целью повышения их производительности: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Б.Н. Токарев – М., 1974. – 20 с.

55. Мартынова Н.Б. Технология строительства закрытого дренажа мобильными узкотраншейными дреноукладчиками на мелкоконтурных участках: автореф. дис. канд. техн. наук / Н.Б.. Мартынова-М., 1996. – 21 с.

56. Слепченко В.А. Обоснование и выбор основных параметров режущего инструмента экскаваторов траншейных бесковшовых: дис. ... канд. техн. наук. Иркутск. – 2004 – 135 с.

57. Сухарев Р.Ю. Совершенствование системы управления рабочим органом цепного траншейного экскаватора : дис.... канд.техн. наук. – Омск, 2008. – 187 с.

58. Школьный А.Н. Обоснование выбора конструктивных и технологических параметров исполнительного органа бесковшовых цепных траншеекопателей: автореф. дис....канд. техн. наук. – Томск, 2006. 23с.

59. Летопольский А.Б. Выбор и обоснование конструктивных параметров режущих рабочих органов траншейного цепного экскаватора [Текст]: автореф. дис....канд. техн. наук: 05.05.04 / А.Б. Летопольский; Сибирс. гос. автомобильно-дорожная акад. – Омск 2011.-22 с.

60. Зеленин А.Н., Баловнев В.И., Керов И.П. Машины для земляных работ. М.: Машиностроение, 1975. 424 с.

61. Dinglinger E. Uber dem Grabewiderstand / E. Dinglinger. – Forder–technik, Bd. 22, 1929.

62. Казаков В. С. Технологические основы бестраншейного строительства закрытых осушительных систем и рыхления почвогрунтов при мелиорации земель / В. С. Казаков: автореф. дис.... докт. техн. наук. – М., 1983.

63. Казаков В.С. Глубокие рыхлители тяжелых почв. В кн.: Осушение тяжелых почв: науч. тр. ВАСХНИЛ. М.: Колос, 1981. С. 202–215.

64. Казаков В.С. Способы глубокого мелиоративного рыхления тяжелых почв. В кн.: Мелиорация почв и борьба с засолением земель в Поволжье. М., 1979. С. 60–81.

65. Уродов В. И. Физические основы глубокого резания грунтов. Мн.: Наука и техника, 1972. 232 с.

66. Циммерман А.Е. К обоснованию параметров ножа-щелереза. Науч.-техн. бюл. СибНИИСХОЗА. 1977. Вып. 23. С. 24–28.

67. Машины для земляных работ: учебник / Н.Г. Гаркави, В.И. Аринченков, В.В. Карпов и др.; под общ. ред. Н.Г. Гаркави. М.: Высшая школа, 1982. 335 с.
68. Руднев В.К. Результаты экспериментов по резанию грунтов прямоугольными ножами. *Известия вузов. Строительство и архитектура*. 1964. №9. С. 112–117.
69. Ермилов А.В., Шаламов А.Н. Математическая модель усилия глубокого резания грунта узкими ножами. Моск. автомоб.-дорожный ин-т. М., 1983. 21 с. Рукопись деп. в ЦНИИТЭстроймаше 29.03.84, №45 сд. Д 84.
70. Баловнев В. И. Моделирование процессов взаимодействия со средой рабочих органов дорожно-строительных работ: учебн. пособ. М.: Высшая школа, 1981. 335 с.
71. Холодов А. М. Основы динамики землеройно-транспортных машин. М.: Машиностроение, 1968. 158 с.
72. Полтавцев И.С., Орлов В.Б., Ляхович И. Ф. Специальные землеройные машины и механизмы для городского строительства. К.: Будівельник, 1977. 136 с.
73. Кравець Л. Б. Влияние угла заострения ножа на критическую глубину резания грунта. В кн: Роль мелиорации в программе «Интенсификация-90: сб. науч. тр. 1986. С. 87–92.
74. Godwin R.I., Spoor G.J. Soil failure with narrow tines. *Agric Eng Res* 22: 213–228, 1977.
75. Соколовский В.В. Статика сыпучей среды. М.: Наука, 1960. 560 с.
76. Sokolovski V.V. *Staties of Soil Media*. London: Butterworth, 1956.
77. Кравець С.В., Кованько В.В., Лук'янчук О.П. Наукові основи створення землерийно-ярусних машин і підземнорухомих пристроїв: монографія. Рівне: НУВГП, 2015. 322 с.
78. Ткачук В.Ф., Кравец С.В., Кравец Л.Б. Определение критической глубины резания грунта ножом. *Горн., строит. дор. и мелиорат. машины*: Респ. межвед. науч.-техн. сб. 1987. Вып. 40. С. 22–28.

79. Кравець С. В., Кирикович В.Д., Блажівський В.С. Визначення критичної глибини різання при напівблокованому різанні ґрунту. *Вісник Націон. ун-ту водн. госп. та природокор.*: зб. наук. праць. 2007. Вип. 3 (частина 2). С. 220–225.

80. Кравець С.В. Ґрунтозахисні та енергозберігаючі машини для прокладки підземних комунікацій. (Основи теорії, проектування та створення): навч. посібник. Рівне: РДТУ, 1999. 278 с.

81. Кравець С.В., Скоблюк М.П., Стіньо О.В., Зоря Р.В. Критично-глибинні двоярусні ґрунторозпушувачі: монографія. Рівне: НУВГП, 2018. 232 с.

82. Вольтерс А. Ю. Закономерности стружкообразования при щелевом и последовательном резании. *Горн., строит., дор. и мел. машины*: Респ. межвед. науч.-техн. сб. 1991. Вып. 45. С. 39–45.

83. Крупко В.А., Смирнов В.Н., Шемет И.А. Размеры области пластической деформации модели ґрунта при резании плоским ножом. *Горн., строит. и дор. машины*: Респ. межвед. науч.-техн. сб. 1985. Вып 38. С. 47–50.

84. Зеленин А.Н., Карасев Г.Н., Красильников Л.В. Лабораторный практикум по резанию ґрунтов: учебное пособие. М. : Высшая школа, 1969. 310 с.

85. Станевский В.П. Совершенствование рабочего процесса землеройных машин. К.: Вища школа. Изд-во при КГУ, 1984. 128 с.

86. Крупко В.А., Смирнов В.Н., Вольтерс А.Ю. Последовательное и щелевое резание. *Горн., строит., дор. и мел. машины*. Респ. межвед. науч.-техн. сб. 1990. Вып. 43. С. 40–44.

87. Файзинбельг М.Л., Тархов А.И., Румянцев В.А. Оптимальные рабочие режимы траншейных экскаваторов. *Строительные и дорожные машины*. 1975. № 6. С. 32–33.

88. Позин Ж. З. Основы вибора и поддержания оптимальних режимов работы исполнительных органов угледобывающих машин. *Разрушение горных пород механическими способами*. М.: Наука, 1966. С. 207–223.

89. Ковригін В. А. Изменение производительности универсального роторного экскаватора в зависимости от изменения сопротивления грунтов копанью. *Труды МИСИ*. 1968. Вып. №59. С. 32–39.

90. Тархов А.И. Научные основы рационального конструирования приводов траншейных экскаваторов: дисс.... д-ра техн. наук. – М:МИСИ, 1984.

91. Тархов А.И., Ащеулов А. В., Гриф Г. В. Математическая модель механической системы многоковшового экскаватора. *Динамика строительных и дорожных машин*. Ярославль, 1991. С. 5–12.

92. Троицкий С. Н. Оптимизация процесса экскавации роторных траншеекопателей как средство повышения их производительности: дисс.... канд. техн. наук. – М, 1976. – 143 с.

93. Стрельников А.Н. Определение рациональных режимов работы цепных траншейных экскаваторов со скребковым рабочим органом: дисс.... канд.. техн. наук. – Иркутск, 2003. – 107 с.

94. Гапонов О.О., Косяк О.В., Пухтаєвич О.І. Передумови створення критично-глибинних режимів роботи багатоскребкових ланцюгових траншейних экскаваторів. *Строительство. Материаловедение. Машиностроение*. 2018. Вып. №103. С. 145–152.

95. Кравець С.В. Супонєв В.М., Бундза О.З., Гапонов О.О. Визначення довжини лемеша та сили різання ґрунту різцями (зубами) траншейних экскаваторів. *Вестник ХНАДУ*: сб. науч. тр. 2019. Вып. 87, том 2. С. 78–86.

96. Гапонов О.О., Кравець С.В., Косяк О.В., Янчик Т.О. Визначення числа ліній різання та висоти ґрунтотранспортуючих скребків ланцюгово-скребкових траншейних экскаваторів. *Будівництво, матеріалознавство, машинобудування. Інтенсифікація робочих процесів будівельних та дорожніх машин. Серія: Підйомно-транспортні, будівельні та дорожні машини і обладнання*: зб. наук. пр. 2019. Вып. № 107. С. 66–74.

97. Кравець С.В., В.М. Супонєв, О.О. Гапонов, О.З. Бундза. Визначення робочої швидкості різання ланцюговоскребковим траншеекопачами, що здійснюють критично-глибинне різання ґрунту. *Dynamics of the development of*

world science. Abstracts of I International Scientific and Practical Conferenct. 25–27 September, Vancouver, Canada, 2019. P. 328–333.

98. S. Kravets, V. Suponyev, A. Goponov, S. Kovalevskyi, A. Koval Determination efficient operating modes and sizes of blades for multi-scraper trench excavators. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий.* 2020. № 4/1(16). С. 23–28.

99. Руднев В.К. Моделирование и планирование экспериментов. Красноярск: Красноярский политехнический институт. 1981. 59 с.

100. Кравець С.В., Лук'янчук О.П., Тимейчук О.Ю. Дослідження робочих процесів машин і методи оптимізації: навчальний посібник. Рівне: НВУВГП, 2011. 240 с.

101. Холодов А.М., Руднев В.К., Гарнець В.М. Технічні основи створення машин. К.: НМКВО, 1992. 300 с.

102. Крушельницька О.В. Методологія і організація наукових досліджень: навч. посібник. К.: Кандор, 2003. 192 с.

103. Зеленин А.Н., Баловнев В.И., Керов И.П. Машины для земляных работ. М.: Машиностроение, 1975. – 424 с.

105. Кравець С.В. Теорія руйнування робочих середовищ: навчальний посібник. Рівне: НУВГП, 2008. 124 с.

106. Машины для земляных работ: навчальний посібник / Л.А. Хмара, С.В. Кравець, В.В. Нічке та ін.; за заг. ред. д.т.н., проф. Л.А. Хмари та д.т.н. проф. С.В. Кравця. Рівне-Дніпропетровськ-Харків, 2010. 557 с.

107. Кравець С.В., Скоблюк М.П., Стіньо О.В., Зоря Р.В. Критично-глибинні двоярусні ґрунторозпушувачі: монографія. Рівне: НУВГП, 2018. 322 с.

108. Кравець С.В., Мусійко В.Д., Пухтаєвич О.І. Визначення раціональних режимів роботи інтенсифікаторів розвантаження ґрунту з робочих органів землерийних машин безперервної дії. *Вісник Національного транспортного університету.* 2018. Вип. №1(40). С. 241–251.

109. Машины для земляных работ: учебник / Л.А. Хмара, С.В. Кравець, М.П. Скоблюк та ін.; за заг. ред. д.т.н., проф. Л.А. Хмари та д.т.н. проф. С.В. Кравця. Х. :ХНАДУ, 2014. 548 с.

110. Дорожные машины. Ч.1. Машины для земляных работ / В.А. Алексеева, К.А. Артемьев, А.А. Бромберг и др. М.: Машиностроение, 1972. 504 с.

111. Кравець С.В., Лук'янчук О.В., Супонев В.М., Гапонов О.О. Методика розрахунку параметрів скребкового робочого органа траншейного екскаватора на основі критичноглибинного різання ґрунтів. Гірничі, будівельні, дорожні і меліоративні машини. Київ, КНУБА, 2020. №96. С. 5–12.

112. Описание и технические характеристики екскаватора ЕТЦ-165А [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://w.w.w.techstory.ru/exco_mn/tex/etc165a_tex.htm Заг.з екрана.

113. Агромол. Каталог товарів [Електронний ресурс]. Режим доступу: http://agromoto.ua/traktora_belarus Заг.з екрана.

114. Ремгідромастер. Офіційний представник «Беларусь» в Україні [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://remgromaster.com.ua/barovaya-ustanovka-etc-165-transheqnyj-ecskavator> Заг.з екрана.

115. Витрати на вантажні перевезення [Електронний ресурс]. Режим доступу <http://lardi-trans.com/gruz> Заг.з екрана.

116. Збірник доповнень і поправок до кошторисних норм СНіП IV-3-82 [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://docs.cntd.ru/document/1200000885> Заг.з екрана.

117. Солнцев В.Г., Мануйлов Ю.Г., Мелиораторные машины в СССР. *Строительные и дорожные машины*. 1977. Вып. №10. С. 5–6.

ДОДАТОК А

РЕЗУЛЬТАТИ РОЗРАХУНКІВ ТЕОРЕТИЧНИХ ЗАЛЕЖНОСТЕЙ

Таблиця А.1 – Залежність критичної глибини різання та відстані між суміжними різцями від кута різання (грунт – напівтвердий суглинок)

α_p , град $b_{\text{бл}}$, м		20°	30°	40°	50°
0,02	$h_{\text{кр}}$, м	0,133	0,096	0,074	0,057
0,03	$h_{\text{кр}}$, м	0,200	0,144	0,110	0,086
0,02	$\alpha_p^{\text{бл}}$, м	0,174	0,126	0,097	0,075
0,03	$\alpha_p^{\text{бл}}$, м	0,262	0,188	0,144	0,113

Таблиця А.2 – Залежність кількості ліній різання від ширини траншеї ($b_{\text{бл.}} = 0,02$ м, грунт – напівтвердий суглинок)

α_p , град $i_{\text{л}}^{\text{бл}}$	20°	30°	40°	50°
2	0,256	0,196	—	—
3	0,450	0,342	0,280	0,236
4	—	0,488	0,397	0,331
5	—	—	—	0,426

Таблиця А.3 – Залежність кількості ліній різання від ширини траншеї ($b_{\text{бл.}} = 0,03$ м, грунт – напівтвердий суглинок)

α_p , град $i_{\text{л}}^{\text{бл}}$	20°	30°	40°	50°
2	0,385	0,292	0,242	0,211
3	—	0,510	0,416	0,354
4	—	—	—	0,497
5	—	—	—	—

Таблиця А.4 – Залежність висоти скребків від ширини траншеї, м
($\alpha_p=30^\circ$) (грунт – напівтвердий суглинок)

$b_{\text{бл}}, \text{ м}$ \diagup $B, \text{ м}$	0,196	0,342	0,488
0,02	0,09	0,103	0,072
0,03	0,137	0,157	—
$b_{\text{бл}}, \text{ м}$ \diagdown $B, \text{ м}$	0,292	0,51	—

Таблиця А.5 – Залежність швидкості різання від ширини траншеї, м/с
(грунт – напівтвердий суглинок)

$b_{\text{бл}}, \text{ м}$ \diagup $B, \text{ м}$	0,196	0,342	0,488
0,02	2,3	2,16	2,56
0,03	1,82	1,68	—
$b_{\text{бл}}, \text{ м}$ \diagdown $B, \text{ м}$	0,292	0,51	—

Таблиця А.6 – Залежність технічної продуктивності від ширини траншеї,
м³/год (грунт – напівтвердий суглинок)

$b_{\text{бл}}, \text{ м}$ \diagup $B, \text{ м}$	0,196	0,342	0,488
0,02	91,3	171,2	162,4
0,03	175,2	335,3	—
$b_{\text{бл}}, \text{ м}$ \diagdown $B, \text{ м}$	0,292	0,51	—

Таблиця А.7 – Залежність робочої швидкості екскаватора від ширини траншеї, м/с (грунт – напівтвердий суглинок)

$(B \cdot H) = F$ $b_{\text{бл}}, \text{ м}$	$(0,196 \cdot 1,53) = 0,3$	$(0,342 \cdot 1,46) = 0,5$	$(0,488 \cdot 1,43) = 0,7$
0,02	0,085	0,095	0,064
0,03	0,097	0,133	—
$b_{\text{бл}}, \text{ м}$ $(B \cdot H) = F$	$(0,292 \cdot 1,71) = 0,3$	$(0,51 \cdot 1,37) = 0,7$	—

Таблиця А.8 – Значення сумарної сили блокованого різання ґрунту різцями, кН ($b_{\text{бл}} = 0,02 \text{ м}$, $Z_{\text{гр}}^3 = 1$, ґрунт – напівтвердий суглинок)

α_p , град	20°	30°	40°	50°
$i_{\text{л}}^{\text{бл}}$	2,3	2,3,4	3,4	3,4,5
$B, \text{ м}$	$(i_{\text{л}}^{\text{бл}} = 2)$ 0,256	$(i_{\text{л}}^{\text{бл}} = 2)$ 0,196	$(i_{\text{л}}^{\text{бл}} = 3)$ 0,280	$(i_{\text{л}}^{\text{бл}} = 3)$ 0,236
$P_{\sum P}^{\text{бл}}, \text{ кН}$	1,8	1,48	2,0	1,45
$B, \text{ м}$	$(i_{\text{л}}^{\text{бл}} = 3)$ 0,450	$(i_{\text{л}}^{\text{бл}} = 3)$ 0,342	$(i_{\text{л}}^{\text{бл}} = 4)$ 0,397	$(i_{\text{л}}^{\text{бл}} = 4)$ 0,331
$P_{\sum P}^{\text{бл}}, \text{ кН}$	4,1	2,68	2,8	2,02
$B, \text{ м}$	—	$(i_{\text{л}}^{\text{бл}} = 4)$ 0,488	—	$(i_{\text{л}}^{\text{бл}} = 5)$ 0,426
$P_{\sum P}^{\text{бл}}, \text{ кН}$	—	3,88	—	2,59

Таблиця А.9 – Значення сумарної сили блокованого різання ґрунту різцями, кН ($b_{\text{бл.}} = 0,03$ м, $Z_{\text{гр}}^3 = 1$, ґрунт – напівтвердий суглинок)

α_p , град	20°	30°	40°	50°
$i_{\text{л}}^{\text{бл}}$	2	2,3	2,3	2,3,4
B , м	0,385	$(i_{\text{л}}^{\text{бл}} = 2)$ 0,292	$(i_{\text{л}}^{\text{бл}} = 2)$ 0,242	$(i_{\text{л}}^{\text{бл}} = 2)$ 0,211
$P_{\sum P}^{\text{бл}}$, кН	4,0	3,2	2,6	2,0
B , м	—	$(i_{\text{л}}^{\text{бл}} = 3)$ 0,51	$(i_{\text{л}}^{\text{бл}} = 3)$ 0,416	$(i_{\text{л}}^{\text{бл}} = 3)$ 0,354
$P_{\sum P}^{\text{бл}}$, кН	—	6,5	4,5	3,4
B , м	—	—	—	$(i_{\text{л}}^{\text{бл}} = 4)$ 0,497
$P_{\sum P}^{\text{бл}}$, кН	—	—	—	4,8

Таблиця А.10 – Значення сумарної сили вільного різання ґрунту різцями, кН ($b_{\text{бл.}} = 0,02$ м, $Z_{\text{гр}}^3 = 1$, ґрунт – напівтвердий суглинок)

α_p , град	20°	30°	40°	50°
$i_{\text{л}}^{\text{бл}}$	2,3	2,3,4	3,4	3,4,5
B , м	$(i_{\text{л}}^{\text{бл}} = 3)$ 0,256	$(i_{\text{л}}^{\text{бл}} = 3)$ 0,196	$(i_{\text{л}}^{\text{бл}} = 3)$ 0,280	$(i_{\text{л}}^{\text{бл}} = 3)$ 0,236
$P_{\sum P}^{\text{с}}$, кН	0,4	0,29	0,44	0,38
B , м	$(i_{\text{л}}^{\text{бл}} = 3)$ 0,450	$(i_{\text{л}}^{\text{бл}} = 3)$ 0,342	$(i_{\text{л}}^{\text{бл}} = 4)$ 0,397	$(i_{\text{л}}^{\text{бл}} = 4)$ 0,331
$P_{\sum P}^{\text{с}}$, кН	0,8	0,58	0,66	0,57
B , м	—	$(i_{\text{л}}^{\text{бл}} = 4)$ 0,488	—	$(i_{\text{л}}^{\text{бл}} = 5)$ 0,426
$P_{\sum P}^{\text{с}}$, кН	—	0,87	—	0,76

Таблиця А.11 – Значення сумарної сили вільного різання ґрунту різцями, кН ($b_{\text{бл.}} = 0,03$ м, $Z_{\text{гр}}^3 = 1$, ґрунт – напівтвердий суглинок)

α_p , град	20°	30°	40°	50°
$i_{\text{л}}^{\text{бл}}$	2	2,3	2,3	2,3,4
B , м	0,385	$(i_{\text{л}}^{\text{бл}} = 2)$ 0,292	$(i_{\text{л}}^{\text{бл}} = 2)$ 0,242	$(i_{\text{л}}^{\text{бл}} = 2)$ 0,211
$P_{\sum P}^e$, кН	0,9	0,66	0,49	0,42
B , м	—	$(i_{\text{л}}^{\text{бл}} = 3)$ 0,51	$(i_{\text{л}}^{\text{бл}} = 3)$ 0,416	$(i_{\text{л}}^{\text{бл}} = 3)$ 0,354
$P_{\sum P}^e$, кН	—	1,32	0,98	0,84
B , м	—	—	—	$(i_{\text{л}}^{\text{бл}} = 4)$ 0,497
$P_{\sum P}^e$, кН	—	—	—	1,26

Таблиця А.12 – Значення сумарної сили різання ґрунту всіма різцями, кН ($b_{\text{бл.}} = 0,02$ м, $Z_{\text{гр}}^3 = 1$, ґрунт – напівтвердий суглинок)

α_p , град	20°	30°	40°	50°
$i_{\text{л}}^{\text{бл}}$	2,3	2,3,4	3,4	3,4,5
B , м	$(i_{\text{л}}^{\text{бл}} = 2)$ 0,256	$(i_{\text{л}}^{\text{бл}} = 2)$ 0,196	$(i_{\text{л}}^{\text{бл}} = 3)$ 0,280	$(i_{\text{л}}^{\text{бл}} = 3)$ 0,236
$P_{\sum P}$, кН	2,2	1,77	2,44	1,83
B , м	$(i_{\text{л}}^{\text{бл}} = 3)$ 0,450	$(i_{\text{л}}^{\text{бл}} = 3)$ 0,342	$(i_{\text{л}}^{\text{бл}} = 4)$ 0,397	$(i_{\text{л}}^{\text{бл}} = 4)$ 0,331
$P_{\sum P}$, кН	4,9	3,26	3,46	2,59
B , м	—	$(i_{\text{л}}^{\text{бл}} = 4)$ 0,488	—	$(i_{\text{л}}^{\text{бл}} = 4)$ 0,426
$P_{\sum P}$, кН	—	4,75	—	3,35

Таблиця А.13 – Значення сумарної сили різання ґрунту всіма різцями, кН ($b_{\text{бл.}} = 0,03$ м, $Z_{\text{гр}}^3 = 1$, ґрунт – напівтвердий суглинок)

α_p , град	20°	30°	40°	50°
$i_{\text{л}}^{\text{бл}}$	2	2,3	2,3	2,3,4
B , м	0,385	$(i_{\text{л}}^{\text{бл}} = 2)$ 0,292	$(i_{\text{л}}^{\text{бл}} = 2)$ 0,242	$(i_{\text{л}}^{\text{бл}} = 2)$ 0,211
$P_{\Sigma P}$, кН	4,9	3,86	3,09	2,42
B , м	—	$(i_{\text{л}}^{\text{бл}} = 3)$ 0,51	$(i_{\text{л}}^{\text{бл}} = 3)$ 0,416	$(i_{\text{л}}^{\text{бл}} = 3)$ 0,354
$P_{\Sigma P}$, кН	—	7,82	5,48	4,24
B , м	—	—	—	$(i_{\text{л}}^{\text{бл}} = 4)$ 0,497
$P_{\Sigma P}$, кН	—	—	—	6,06

Таблиця А.14 – Значення сумарної сили копання ґрунту багатоскребковим робочим органом, кН ($b_{\text{бл.}} = 0,02$ м, $Z_{\text{гр}}^3 = 1$, ґрунт – напівтвердий суглинок)

α_p , град	20°	30°	40°	50°
$i_{\text{л}}$	2, 3	2, 3, 4	3, 4	3, 4, 5
B , м	$(i_{\text{л}}^{\text{бл}} = 2)$ 0,256	$(i_{\text{л}}^{\text{бл}} = 2)$ 0,196	$(i_{\text{л}}^{\text{бл}} = 3)$ 0,280	$(i_{\text{л}}^{\text{бл}} = 3)$ 0,236
$P_{\Sigma P}$, кН	5,06	3,35	4,18	2,97
B , м	$(i_{\text{л}}^{\text{бл}} = 3)$ 0,450	$(i_{\text{л}}^{\text{бл}} = 3)$ 0,342	$(i_{\text{л}}^{\text{бл}} = 4)$ 0,397	$(i_{\text{л}}^{\text{бл}} = 4)$ 0,331
$P_{\Sigma P}$, кН	9,93	6,03	5,93	4,7
B , м	—	$(i_{\text{л}}^{\text{бл}} = 4)$ 0,448	—	$(i_{\text{л}}^{\text{бл}} = 5)$ 0,426
$P_{\Sigma P}$, кН	—	8,68	—	5,36

Таблиця А.15 – Значення сумарної сили копання ґрунту багатоскребковим робочим органом, кН ($b_{\text{бл.}} = 0,03$ м, $Z_{\text{гр}}^3 = 1$, ґрунт – напівтвердий суглинок)

α_p , град	20°	30°	40°	50°
$i_{\text{л}}^{\text{бл}}$	2	2, 3	2, 3	2, 3, 4
B , м	0,385	$(i_{\text{л}}^{\text{бл}} = 2)$ 0,292	$(i_{\text{л}}^{\text{бл}} = 2)$ 0,242	$(i_{\text{л}}^{\text{бл}} = 2)$ 0,211
$P_{\Sigma P}$, кН	11,37	7,39	5,32	3,94
B , м	—	$(i_{\text{л}}^{\text{бл}} = 3)$ 0,51	$(i_{\text{л}}^{\text{бл}} = 3)$ 0,416	$(i_{\text{л}}^{\text{бл}} = 3)$ 0,354
$P_{\Sigma P}$, кН	—	13,99	9,32	6,79
B , м	—	—	—	$(i_{\text{л}}^{\text{бл}} = 4)$ 0,497
$P_{\Sigma P}$, кН	—	—	—	9,65

Таблиця А.16 – Значення енергоємності розробки одного кубічного метра ґрунту, кДж/м³ ($b_{\text{бл.}} = 0,02$ м, $Z_{\text{гр}}^3 = 1$, ґрунт – напівтвердий суглинок)

α_p , град	20°	30°	40°	50°
$i_{\text{л}}^{\text{бл}}$	2, 3	2, 3, 4	3, 4	3, 4, 5
B , м	$(i_{\text{л}}^{\text{бл}} = 2)$ 0,256	$(i_{\text{л}}^{\text{бл}} = 2)$ 0,196	$(i_{\text{л}}^{\text{бл}} = 3)$ 0,280	$(i_{\text{л}}^{\text{бл}} = 3)$ 0,236
$E_{1\text{м}^3}$, кДж/м ³	148,6	178,0	201,7	220,8
B , м	$(i_{\text{л}}^{\text{бл}} = 3)$ 0,450	$(i_{\text{л}}^{\text{бл}} = 3)$ 0,342	$(i_{\text{л}}^{\text{бл}} = 4)$ 0,397	$(i_{\text{л}}^{\text{бл}} = 4)$ 0,331
$E_{1\text{м}^3}$, кДж/м ³	165,9	183,7	201,6	221,0
B , м	—	$(i_{\text{л}}^{\text{бл}} = 4)$ 0,488	—	$(i_{\text{л}}^{\text{бл}} = 5)$ 0,426
$E_{1\text{м}^3}$, кДж/м ³	—	185,3	—	220,7

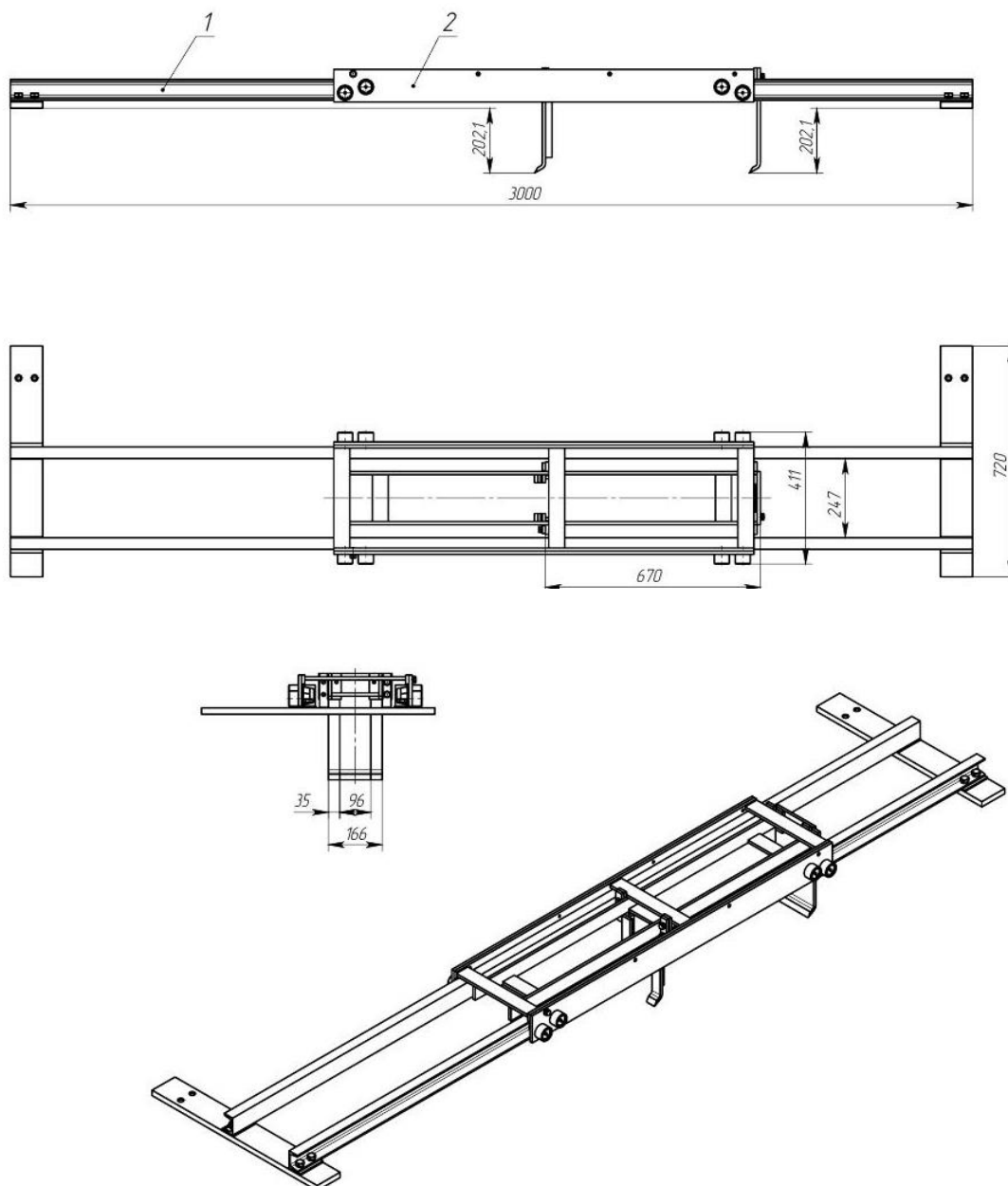
Таблиця А.17 – Значення енергоємності розробки одного кубічного метра ґрунту, кДж/м³ ($b_{\text{бл.}} = 0,03$ м, $Z_{\text{гр}}^3 = 1$, ґрунт – напівтвердий суглинок)

α_p , град	20°	30°	40°	50°
$i_{\text{л}}^{\text{бл}}$	2	2, 3	2, 3	2, 3, 4
B , м	0,385	$(i_{\text{л}}^{\text{бл}} = 2)$ 0,292	$(i_{\text{л}}^{\text{бл}} = 2)$ 0,242	$(i_{\text{л}}^{\text{бл}} = 2)$ 0,211
$E_{1\text{м}}^3$, кДж/м ³	147,7	175,8	199,8	217,1
B , м	—	$(i_{\text{л}}^{\text{бл}} = 3)$ 0,51	$(i_{\text{л}}^{\text{бл}} = 3)$ 0,416	$(i_{\text{л}}^{\text{бл}} = 3)$ 0,354
$E_{1\text{м}}^3$, кДж/м ³	—	190,5	203,7	223,0
B , м	—	—	—	$(i_{\text{л}}^{\text{бл}} = 4)$ 0,497
$E_{1\text{м}}^3$, кДж/м ³	—	—	—	225,8

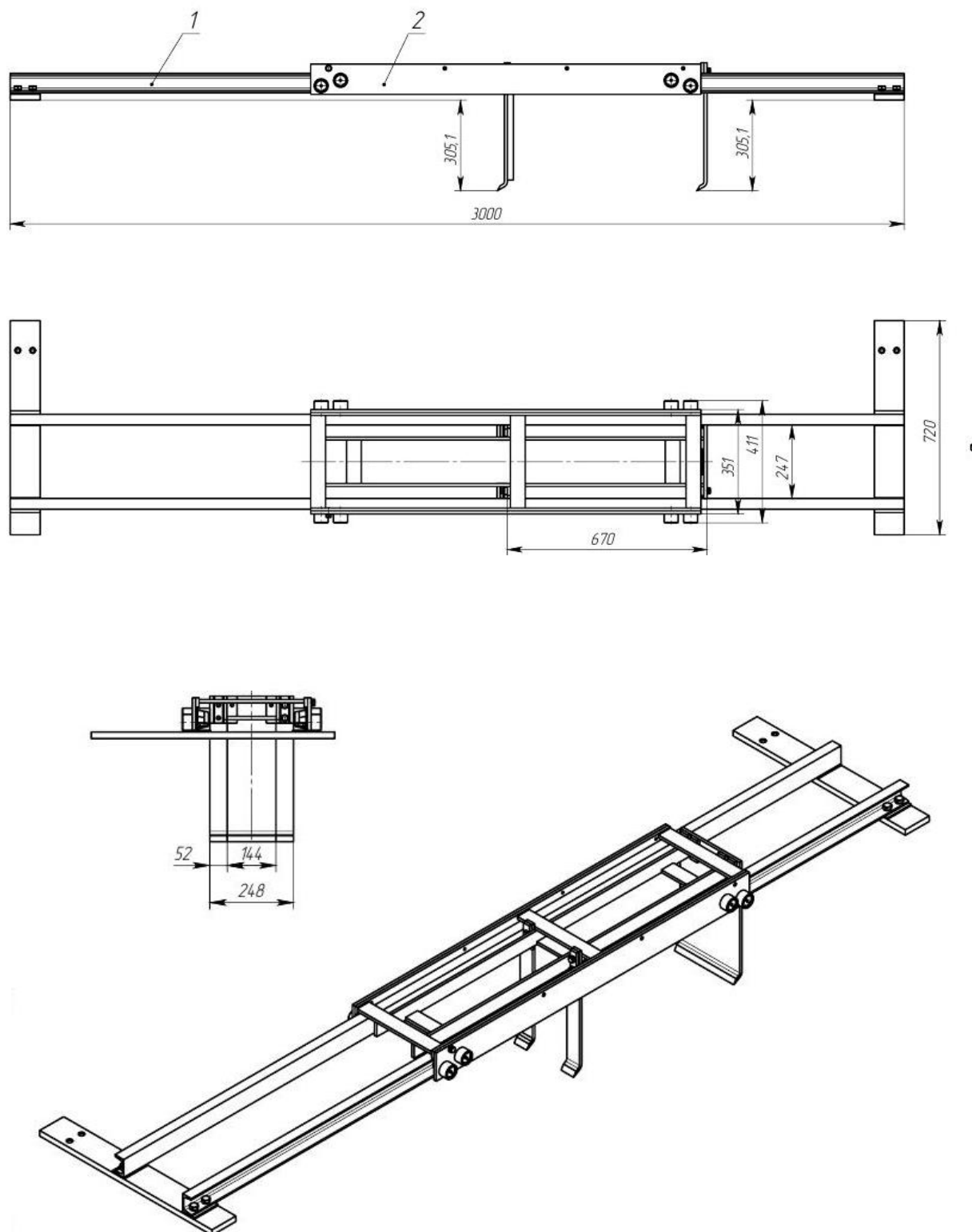
ДОДОТОК Б

КОНСТРУКЦІЇ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ СТЕНДІВ ДЛЯ
ВИПРОБУВАННЯ РОБОТИ СЕКЦІЙ НОЖОВО-СКРЕБКОВОГО
ОБЛАДНАННЯ ЕКСКАВАТОРІВ

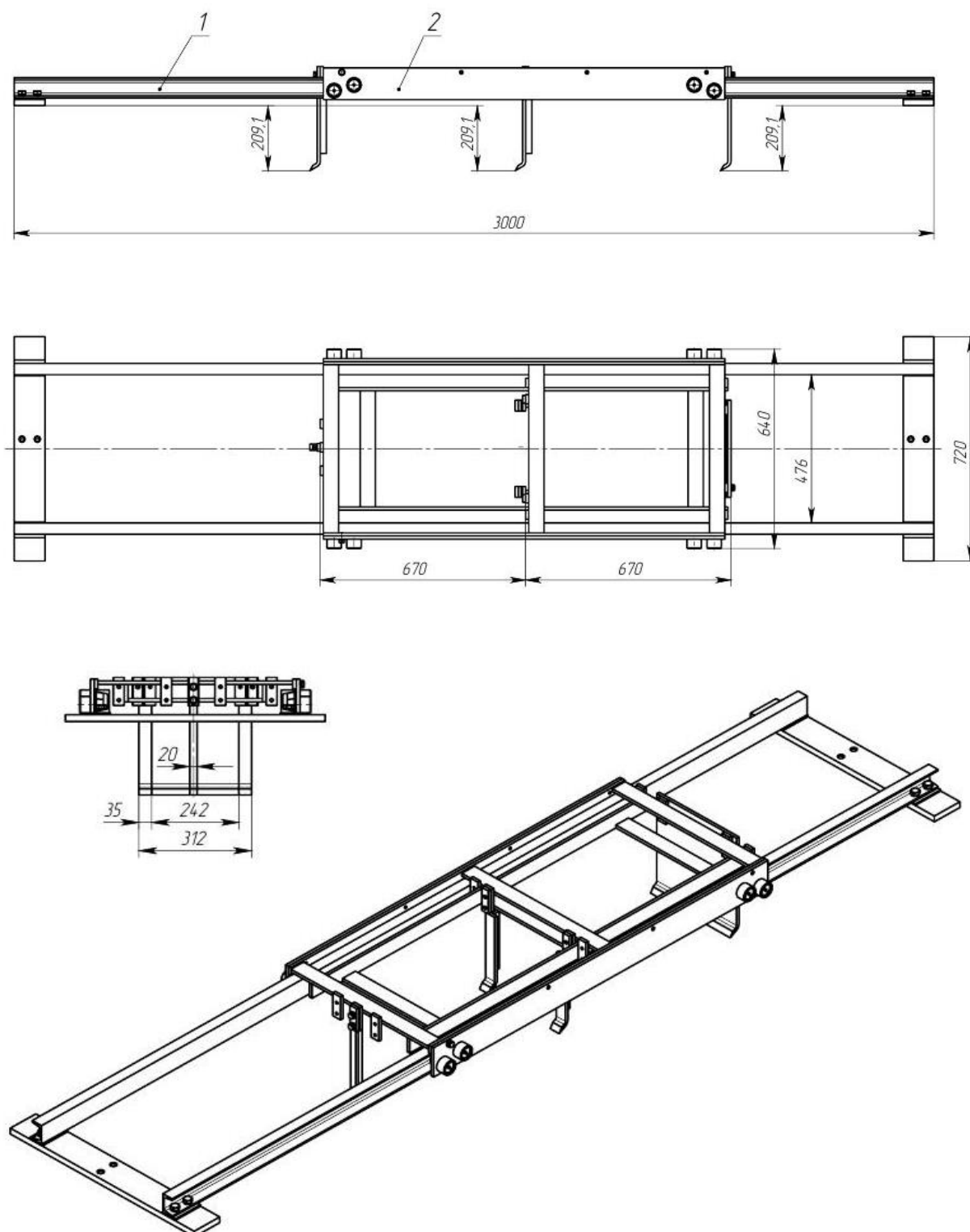
Б1. Стендове обладнання для випробування роботи секцій ножово-скребкового обладнання для копання траншеї шириною 166 мм.



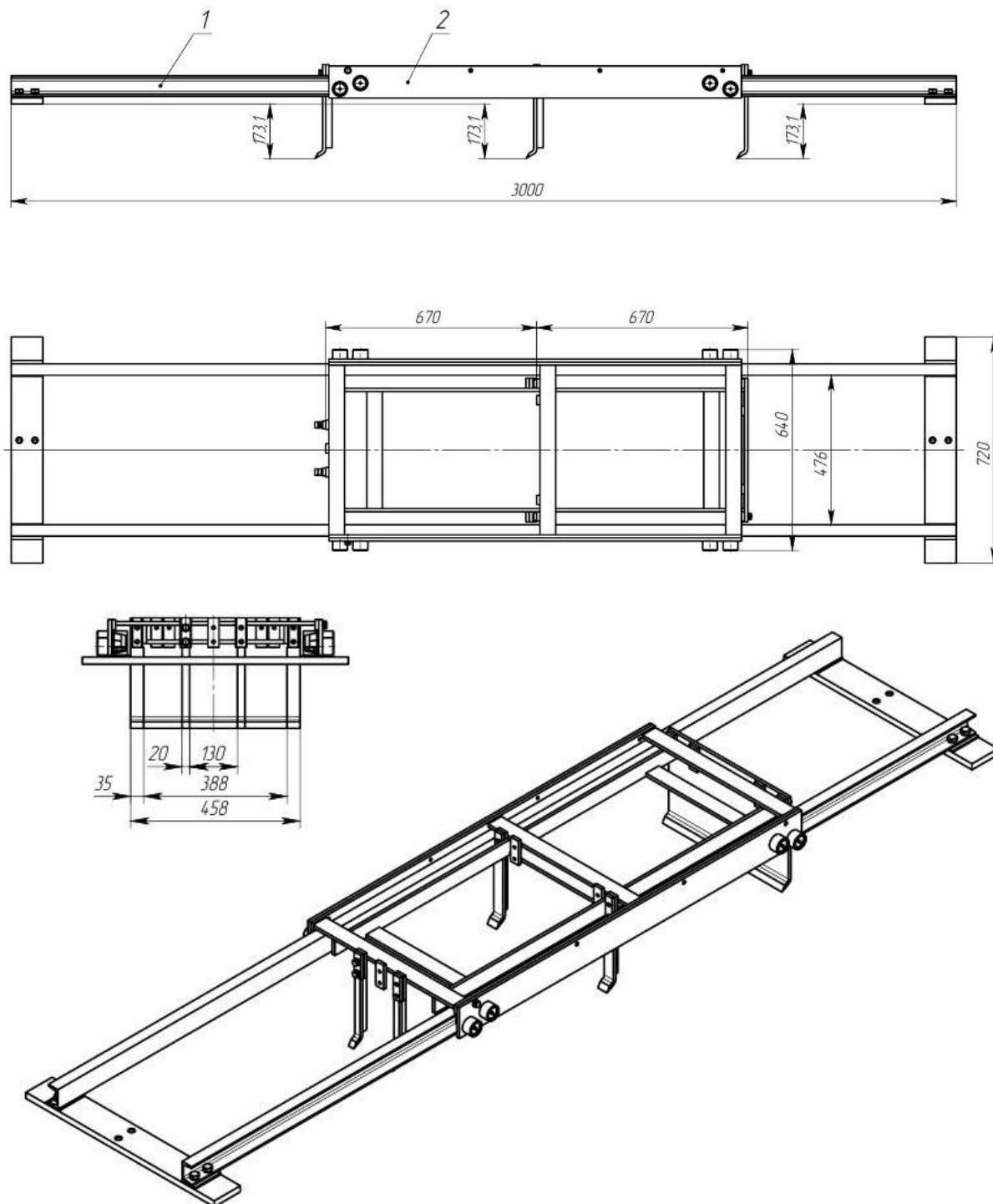
Б2. Стендове обладнання для випробування роботи секцій ножово-скребкового обладнання для копання траншеї шириною 248 мм.



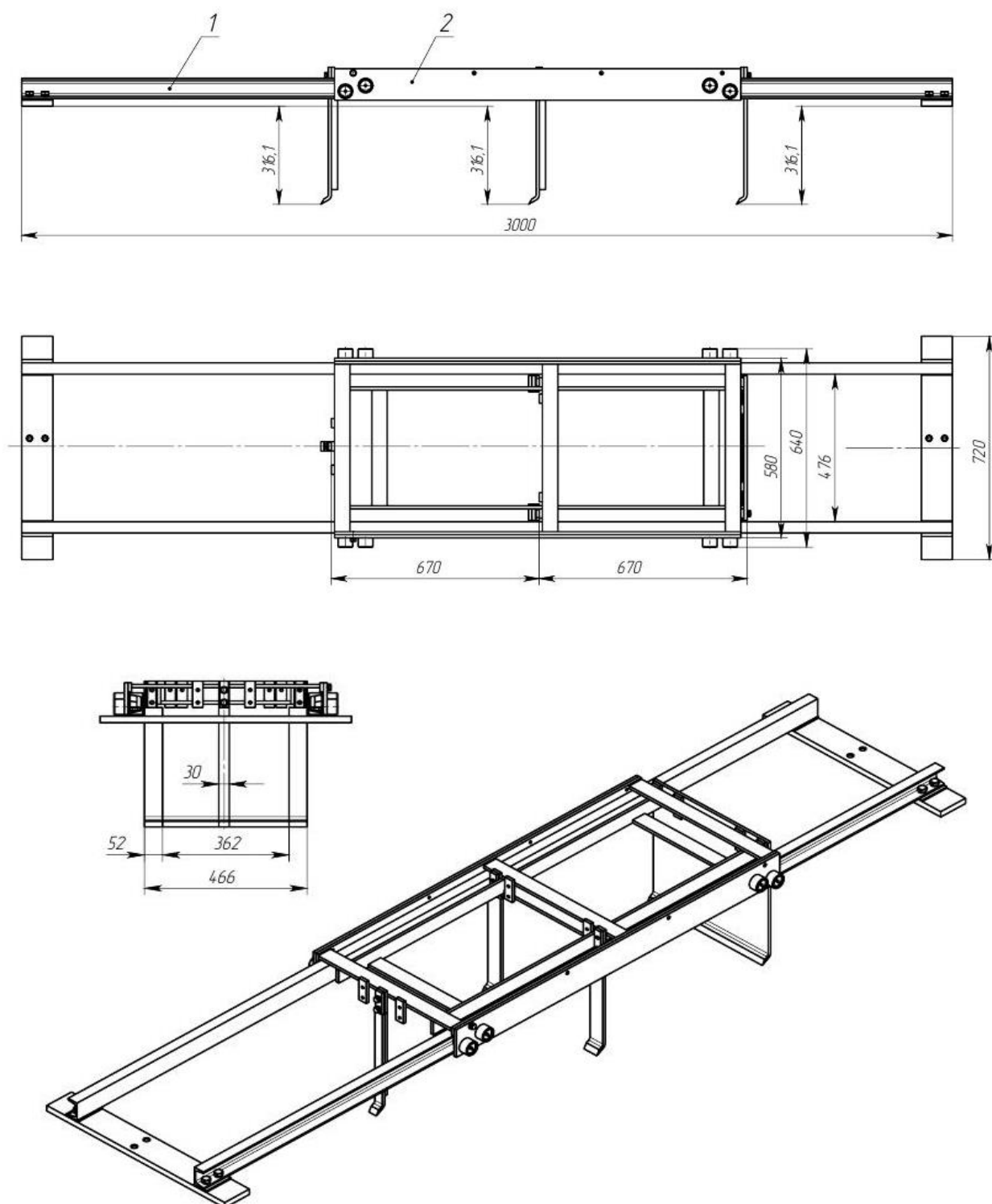
БЗ. Стендове обладнання для випробування роботи секцій ножово-скребкового обладнання для копання траншеї шириною 312 мм.



Б4. Стендове обладнання для випробування роботи секцій ножово-скребкового обладнання для копання траншеї шириною 458 мм.



Б5. Конструкція стендового обладнання для випробування роботи секцій ножово-скребкового обладнання для копання траншеї шириною 466 мм.



ДОДАТОК В

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Публікації у фахових виданнях України

1. Кравець С.В., Супонєв В.М., Гапонов О.О., Бундза О.З. Визначення довжини лемеша та сили різання ґрунту (зубами) траншейних екскаваторів. Вестник ХНАДУ: сб. науч. тр. 2020. Вип. 88, т. 2, С. 78–84. *(Особистий внесок здобувача: складено розрахункову схему для визначення довжини лемеша та різання ґрунту при критично глибинному блокованому різанню ґрунту різцями ланцюгового екскаватора).*

2. Кравець С.В., Супонєв В.М., Гапонов О.О. Визначення критично-глибинних сил різання ґрунтів та енергоємності ланцюгово-скребкових траншейних екскаваторів. Вестник ХНАДУ: сб. науч. тр. 2021. Вип. 92, т. 1. С. 192–199. *(Особистий внесок здобувача: отримано розрахункову залежність для визначення сил критичноглибинного різання ґрунту з урахуванням блокованого різання ґрунту крайніми різцями та розроховано енергоємність процесу).*

Публікації у періодичних наукових виданнях держав, які входять до Організації економічного співробітництва та розвитку, що входять до міжнародних наукометричних баз Scopus або Web of Science

3. Kravets S., Suponyev V., Goponov O., Kovalevskyi S. Koval A. Determination efficient operating models and sizes of blades for multi-scraper trench excavators. Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2020. № 4/1(106). С. 23–28. DOI: 10.15587/1729-4061.2020.208957. *(Особистий внесок здобувача: виконано розрахунки параметрів різців екскаватора, які працюють в режимі критично глибинного блокованого різання ґрунту).*

4. Кравець С.В., Супонєв В.М., Гапонов О.О., Бундза О.З. Визначення робочої швидкості, швидкості подачі та швидкості різання

ланцюгово-скребковими траншеєкопачами, що здійснюють критично глибинне різання ґрунту. The 1st International scientific and practical conference «Dynamics of the development of world science», September 25–27. 2019. Perfect Publishing, Vancouver. С. 328–334. (*Особистий внесок здобувача: отримано розрахункові моделі для визначення швидкості подачі та різання ґрунту робочим обладнанням ланцюговоскребкових екскаваторів*).

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

5. Супонєв В.М., Гапонов О.О., Косяк О.В. Обумовлення параметрів та критично глибинних режимів роботи багато скребкових екскаваторів «Підвищення ефективності піднімально-транспортних, будівельних, дорожніх машин і комплексів»: тези доповідей міжнародної науково-практичної конференції – Дніпро: 2018. С. 33–34.

6. Кравець С.В., Лук'янчук О.О., Гапонов О.О., Косяк О.В. Визначення критичної глибини різання ґрунту боковими різцями (зубами) траншейних екскаваторів. Збірник наукових праць II Міжнародної українсько-азербайджанської конференції. «Building Innovations – 2019», 23–24 травня 2019 р. Полтава: ПолтНТУ, 2019. С. 97–99.

7. Супонєв В.М., Гапонов О.О. Встановлення ефективних режимів роботи багато скребкових траншейних екскаваторів з критично-глибинними різцями // II Міжнародна науково-практична конференція «Комп'ютерні технології і мехатроніка» (28 травня 2020 р.), ХНАДУ, 2020. 391-393 с.

8. Кравець С.В., Супонєв В.М., Гапонов О.О. Визначення енерговитрат роботи скребкового екскаватора в умовах критично глибинного різання ґрунту різцями. VI міжнародна науково-практична конференція «Трансфер інноваційних технологій 2020», 20–21 травня 2020 р. Київ, КНУБА, 2020. С. 71–73.

Публікації, які додатково відображають наукові результати дисертації

9. Гапонов О.О. Встановлення технічної продуктивності ланцюгового екскаватора з різцями, що працюють в умовах критичноглибинного різання ґрунтів. *Transfer of Innovative Technologies*, 2021, 4(1), 78–81. <https://doi.org/10.32347/tit2141.0210>
10. Гапонов О.О., Косяк О.В., Пухтаєвич О.І. Передумови створення критично-глибинних режимів роботи багатоскребкових ланцюгових траншейних екскаваторів / *Строительство. Материаловедение. Машиностроение*. – 2018. №103, с.145-152. *(Особистий внесок здобувача: виконано огляд досліджень роботи ланцюгових екскаваторів та проведений їх аналіз).*
11. Кравець С.В., Гапонов О.О., Косяк О.В., Янчик Т.О. Визначення числа ліній різання та висоти ґрунтотранспортуючих скребків ланцюгово-скребкових траншейних екскаваторів. *Будівництво, матеріалознавство, машинобудування. Інтенсифікація робочих процесів будівельних та дорожніх машин. Серія: Підйомно-транспортні, будівельні та дорожні машини і обладнання* // *Зб. наук. пр. № 107. Дніпро : ДВНЗ «ПДАБА», 2019. с. 66-74. (Особистий внесок здобувача: виконано розрахунок числа ліній різання та висоти ґрунтотранспортуючих скребків ланцюгово-скребкових траншейних екскаваторів).*
12. Кравець С.В., Лук'янчук О.В., Супонєв В.М., Гапонов О.О. Методика розрахунку параметрів скребкового робочого органу траншейного екскаватора на основі критичноглибинного різання ґрунтів. *Гірничі, будівельні, дорожні і меліоративні машини. Київ, КНУБА, 2020. №96. С. 5–12. (Особистий внесок здобувача: додані до інженерної методики розрахунку ланцюгово-скребкових траншейних екскаваторів розрахункові залежності, які враховують критично глибинне різання ґрунту з урахуванням блокованого різання крайніми боковими різцями).*

ДОДАТОК Г
АКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

в виробництво результатів дисертаційної роботи
Гапонова Олексія Олександровича

Даним актом підтверджується, що основні результати науково – дослідницької роботи пошукача Гапонова О.О. за темою: «Підвищення ефективності багатоскребкового ланцюгового траншейного екскаватора на основі критично глибинного різання ґрунтів», які було отримано на кафедрі «Будівельні і дорожні машини» ХНАДУ використовуються підприємством ООО НПП «Газтехніка ЛТД» при модернізації ланцюгових траншейних екскаваторів. В тому числі для модернізації ланцюгового траншейного екскаватора ЕТЛ-208 на базі трактора Т-180 було розроблено технічне завдання, передані розрахунки силових напружень машини, її балансу потужності та тяглового балансу сил та конструкторська документація.

Виробничі іспити машини в польових умовах підтвердили розрахункові характеристики та технологічні можливості екскаватора. Продуктивність копання траншеї в суглинку 2 категорії відповідає розрахунковій і складає при глибині траншеї 1,8 м - 85 м.п/год, що на 25% більш ніж до модернізації екскаватора. Тягової можливості машини та потужності двигуна достатньо для стабільної роботи машини.

На даний час розглядається можливість підготовки технічної документації разом з кафедрою дорожніх машин ХНАДУ до модернізації інших типів ланцюгових траншейних екскаваторів.

Директор

ООО «НВП «Газтехніка ЛТД»



О.Ю. Войтов

ДОВІДКА

Про впровадження результатів дисертаційної роботи Гапонова О.О.
на тему: Підвищення ефективності скребкових ланцюгових екскаваторів
безперервної дії на основі критично глибинного різання ґрунтів

Дана в тому, що результати дисертаційної роботи Гапонова О.О. по удосконаленню процесу копання траншеї шляхом зміни режимів роботи і параметрів різців ланцюгового траншейного екскаватору ЕТЛ-208, що працюють в умовах критично глибинного різання ґрунтів отримала широке практичне використання будівельною компанією ТОВ «Харківспецбуд - 1» при прокладанні електричних мереж, телекомунікацій та водопроводів.

Модернізація екскаватору по розробленій кафедрою будівельних і дорожніх машин ХНАДУ технічної документації з безпосередньою участю Гапонова О.О. дозволили підвищити темпи робіт по прокладанню інженерних комунікацій на 15-20 %. Розрахунки технологічних параметрів та сил опору різання ґрунтів відповідають потужності двигуна, силовим та тяговим можливостям базового трактору Т-180.

Директор

ТОВ «Харківспецбуд - 1»



І.В. Купровський

Затверджую:
 Заступник ректора (перший проректор)
 Харківського національного
 автомобільно-дорожнього університету,
 професор С.Я. Ходирев
 « » липня 2021 р.



АКТ

впровадження результатів дисертаційної роботи Гапонова Олексія Олександровича у навчальний процес кафедри будівельних і дорожніх машин ім. А.М. Холодова Харківського національного автомобільно-дорожнього університету.

Комісія у складі: голова комісії - завідувач кафедри будівельних і дорожніх машин ім. А.М. Холодова, канд.техн. наук, доцент Шевченко В.О.;

члени комісії – професор кафедри будівельних і дорожніх машин ім. А.М. Холодова докт. техн. наук Фідровська Н.М.;
 доцент кафедри будівельних і дорожніх машин ім. А.М. Холодова, канд. техн. наук Пімонов І.Г.

склала цей акт про те, що результати дисертаційної роботи О.О. Гапонова були впроваджені у навчальний процес кафедри будівельних і дорожніх машин ім. А.М. Холодова при викладанні лекцій, виконанні практичних, лабораторних робіт та курсового проектування з дисциплін «Машини для земляних робіт», «Динаміка будівельних і дорожніх машин» для студентів освітнього рівня навчання бакалавр та магістр з галузі знань 13 «Галузеве машинобудування» по спеціальності 133 – «Підйомно-транспортні, будівельні, дорожні, меліоративні машини і обладнання».

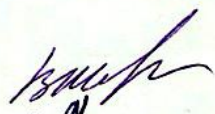
Були використані наступні результати:

- розрахунки основних параметрів робочого обладнання та режимів роботи ланцюгового траншейного екскаватора з критично глибинним різанням ґрунтів;
- методика визначення технологічних параметрів та продуктивності ланцюгового траншейного екскаватора з критично глибинним різанням ґрунтів.

Наведені результати використовуються під час викладення лекційного матеріалу, при виконанні практичних та лабораторних робіт, курсових проектів, при дипломному проектуванні.

Голова комісії

Члени комісії

 В.О. Шевченко

 Н.М. Фідровська

 І.Г. Пімонов