

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Міністерство освіти і науки України

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

ВОРОБІЙОВ ОЛЕКСІЙ МИКОЛАЙОВИЧ

УДК 621.01:631.31

ДИСЕРТАЦІЯ
МОДЕЛЮВАННЯ КОНСТРУКЦІЙНО-ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ
ГЕОМЕТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ І ХАРАКТЕРИСТИК МЕХАНІЧНИХ
ДИСКОВИХ ҐРУНТООБРОБНИХ ЗНАРЯДЬ З ПЕРСПЕКТИВОЮ
РОБОТИЗАЦІЇ

Спеціальність 131 – Прикладна механіка

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. М. Воробйов

Науковий керівник Яблонський Петро Миколайович
доктор технічних наук, доцент

Київ – 2026

АНОТАЦІЯ

Воробйов О.М. Моделювання конструкційно-експлуатаційних геометричних параметрів і характеристик механічних дискових ґрунтообробних знарядь з перспективою роботизації. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії в галузі знань 13 «Механічна інженерія» за спеціальністю 131 «Прикладна механіка» – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, 2026.

Актуальність теми виконаного дослідження обумовлена потребами теорії та практики в подальшому вдосконаленні конструкційно-експлуатаційних геометричних параметрів і характеристик різноманітних машин, зокрема дискових знарядь для механічного обробітку ґрунту. Зазначені питання також важливі на нинішньому етапі розвитку нашої держави, пов'язаному з воєнними діями на її території. У цей скрутний час сільське господарство, де дискові знаряддя для обробітку ґрунту найбільш розповсюджені, відіграє одну з провідних ролей в економіці України. Тому покращення його ефективності становить нагальну проблему для багатьох наукових розвідок.

Відомо, що форма, розміри та положення складових технічних об'єктів суттєво впливають на їхнє проєктування, виготовлення, подальшу експлуатацію, якість промислової продукції. Не виключенням із наведеного правила є також дискові знаряддя для механічного обробітку ґрунту, яким присвячено дане дисертаційне дослідження. Окреслені параметри й характеристики формують базові показники багатьох відповідних аграрних процесів. Це стосується, наприклад, впливу на врожайність рослинних культур, енергетичних, матеріальних, фінансових та інших витрат, дотримання екологічних вимог і т. д.

Методи, спрямовані на вивчення об'єктів шляхом використання замість оригіналів подібних до них моделей, становлять основу широкого кола наукових досліджень. Такий підхід дозволяє у прийнятні терміни пізнавати тривалі та швидкоплинні явища і процеси, економити при цьому різноманітні ресурси.

Відомо, що моделі поділяються на *матеріальні* та *інформаційні*. Перші відображують досліджувані властивості опрацьовуваних об'єктів, явищ і процесів за допомогою певних предметів, речовин тощо, а другі – шляхом застосування необхідних описів. У залежності від характеру останніх виокремлюють лінгвістичні, математичні, комп'ютерні та інші моделі. Кожні з них за своїми ознаками поділяються на відповідні види. Зокрема, математичні бувають аналітичними, геометричними, детермінованими, стохастичними, дискретними, неперервними, статичними, динамічними, комбінованими (наприклад, графоаналітичними) тощо.

Стрімкий розвиток автоматизованого проектування продукції машинобудування багато в чому обумовлений досягненнями у сфері комп'ютерного геометричного моделювання на основі NURBS (Non-Uniform Rational B-Splines), тобто неоднорідних раціональних базисних сплайнів. Наведені засоби дозволяють уніфіковано подавати всі криві та поверхні другого порядку, а також фігури вищих степенів. Це слугує підґрунтям для гнучкого відтворення віртуальних твердотільних об'єктів шляхом їхнього граничного представлення, іншими словами B-rep (Boundary representation) методами. У даному випадку тривимірне тіло подається обмежувачими границями у вигляді граней, ребер і вершин.

Логічним продовженням окресленої технології постає параметричне конструювання в середовищі сучасних машинобудівних CAD/CAE/CAM (Computer-Aided Design / Computer-Aided Engineering / Computer-Aided Manufacturing) систем. Це дозволяє гнучко і продуктивно генерувати різноманітні проєктні варіанти опрацьовуваних виробів з метою їхньої комплексної оптимізації. Подальшим узагальненням такого підходу є запропонована науковою школою «Геометричного моделювання об'єктів, процесів та явищ» КПІ ім. Ігоря Сікорського методологія структурно-параметричного формоутворення, яка апробована у вітчизняній авіаційній галузі. Наявні способи, прийоми та алгоритми можуть бути не тільки успішно застосовані для проєктування іншої техніки, наприклад сільськогосподарської,

а й належним чином удосконалені, що також становить завдання даного дослідження. Зокрема, це стосується інтеграції процесів проєктування та експлуатації дискових знарядь для механічного обробітку ґрунту, тобто відповідних етапів їхнього життєвого циклу. Зазначене дозволяє підвищувати якість сільськогосподарської техніки, знижувати витрати на неї.

Основою для узгодження суперечливих вимог при багатокритеріальній оптимізації промислової продукції зазвичай постають геометричні моделі, які поєднують поміж собою інші моделі (конструкційні, міцності, технології виготовлення, експлуатаційні тощо). Отже, викладеними вище фактами показано актуальність обраної теми наукових розвідок.

Дисертацію виконано на кафедрі нарисної геометрії, інженерної та комп'ютерної графіки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» в рамках науково-технічної роботи «Автоматизоване варіантне геометричне моделювання технічних об'єктів» із державним номером реєстрації 0114U002701.

Об'єктом дослідження є проєктування та експлуатація механічних виробів.

Предмет дослідження становлять інтегровані конструкційно-експлуатаційні геометричні моделі дискових сошників і підгортачів.

Даними науковими розвідками проведено аналіз нинішнього стану проєктування технічних об'єктів машинобудування на прикладі сільськогосподарських знарядь для механічного обробітку ґрунту, визначено деякі перспективні напрямки їхнього розвитку. Зокрема, це стосується дискових засобів, які, порівняно з іншими, характеризуються меншими енергетичними витратами при реалізації різноманітних аграрних технологій, кращим збереженням корисних властивостей ґрунту, більшою відповідністю наявним екологічним вимогам. Також було показано провідне місце в зазначених процесах автоматизованого проєктування комп'ютерних геометричних моделей, які для інших дисциплін відіграють об'єднуювальну роль при узгодженні існуючих протиріч під час комплексної оптимізації.

На підставі викладених вище фактів і міркувань визначено пріоритетні завдання даного дослідження. Головну мету при цьому становить напрацювання належного математичного апарату варіантного інтегрованого моделювання дискових знарядь для механічного обробітку ґрунту. Мається на увазі поєднання конструкційних та експлуатаційних геометричних параметрів і характеристик наведених виробів.

Для розв'язування окреслених задач використовувалися методи автоматизованого проєктування технічних об'єктів, конструювання продукції машинобудування, ґрунтообробної механіки, аграрних технологій, математичного аналізу, обчислювальної геометрії, теорії множин і графів, оптимізації, програмування, комп'ютерної графіки.

У дисертації представлено новий підхід до моделювання таких дискових знарядь для механічного обробітку ґрунту, як сошники й підгортачі. Подано запропонований математичний апарат, що спирається на структурно-параметричну методологію формоутворення. Розглянуто належні моделі, відповідну комп'ютерну реалізацію, проаналізовано застосовані та напрацьовані способи, прийоми й алгоритми, вказано напрямки їхнього подальшого вдосконалення. Здійснено впровадження результатів виконаного дослідження у практику сільськогосподарського виробництва та навчальний процес вищої школи. Окреслено перспективні напрямки моделювання дискових знарядь для механічного обробітку ґрунту.

Наукова новизна результатів дисертації.

Уперше:

- *обґрунтовано* доцільність використання інтегрованого підходу до моделювання конструкційно-експлуатаційних геометричних параметрів та характеристик дискових знарядь для механічного обробітку ґрунту на засадах методології структурно-параметричного формоутворення;

- *розроблено* математичний апарат інтегрованого моделювання конструкційно-експлуатаційних геометричних параметрів і характеристик дискових сошників та підгортачів;

- *розроблено* спосіб керування отримуваним профілем борозни за допомогою кутів позиціонування дисків на основі встановлених відповідних аналітичних залежностей;

- *напрацьовано* концептуальну конструкцію універсальних дводискових сошників, пристосованих для здійснення як звичайної, так і вузькорядної сівби;
- *розроблено* конструкцію дводискового сошника з гнучкою багатоланковою стовбою у вигляді роботизованої системи з дистанційно-керованими елементами;
- *розроблено* метод граничних оцінок впливу профілю борозни на експлуатаційні енергетичні характеристики ґрунтообробних знарядь, який проілюстровано на прикладі дводискових сошників.

Удосконалено теорію автоматизованого варіантного проєктування виробів машинобудування запропонованими інтегрованими конструкційно-експлуатаційними геометричними моделями дискових знарядь для механічного обробітку ґрунту.

Отримала подальший розвиток методологія структурно-параметричного формоутворення технічних об'єктів машинобудування шляхом розширення застосування принципу інтеграції на визначення конструкційно-експлуатаційних геометричних параметрів і характеристик дискових сошників та підгортачів.

Таким чином, значення виконаних досліджень для науки полягає у здійсненні певного вкладу в розвиток автоматизованого варіантного проєктування технічних об'єктів машинобудування на основі запропонованого математичного апарату інтегрованого опрацювання конструкційно-експлуатаційних геометричних параметрів і характеристик дискових знарядь для механічного обробітку ґрунту, а для практики – у побудові належних моделей цієї продукції. Наведені досягнення покращують якість сільськогосподарської техніки, сприяють зменшенню різноманітних витрат при її проєктуванні, виготовленні та експлуатації, а також можуть бути використані під час створення інших схожих виробів, наприклад, для демаркації територій, прокладання автомобільних і залізничних шляхів, певних мереж, мінування та розмінування тощо.

Отримані в дисертаційному дослідженні наукові результати впроваджено:

- у фермерському господарстві «Росток» Кіровоградської області Уляновського району Кам'янобрідської сільської ради при проведенні

лабораторно-польових експериментальних досліджень. Було вдосконалено конструкцію стовби сошника сівалки, яке полягає в можливості гнучкого налаштування потрібної глибини та ширини посівної борозни, кута нахилу її бокових стінок відповідно до розмірів насіння. Це дозволило здійснювати якісний висів різного за розмірами насіння ячменю й кукурудзи без додаткових, передбачених заводськими інструкціями налаштувань. Регулювання кутів кришення і зсуву поверхневого шару ґрунту дисками сошника розробленої конструкції при сівбі кукурудзи забезпечує розрахункову економію пального до 0,15 л/га залежно від ґрунтово-кліматичних умов та глибини внесення насіння. Покращення загортання насіння та ущільнення дна посівної борозни (насіннєвого ложа) запропонованим пристроєм обумовлює підтік води й поживних речовин до насіння знизу, що підвищує польову схожість ячменю на 2,5 %, кукурудзи на 3% в порівнянні з серійною сівалкою СЗ-3,6А;

– у навчальний процес Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» у вигляді методик автоматизованого варіантного моделювання технічних об'єктів машинобудування під час викладання дисципліни «Інженерна та комп'ютерна графіка».

За темою дисертаційного дослідження опубліковано 24 роботи. З них: у періодичних наукових виданнях за спеціальністю «131 Прикладна механіка», що індексуються базою даних Scopus, – 1; у фахових наукових виданнях України за спеціальністю «131 Прикладна механіка» – 8, за спеціальністю «133 Галузеве машинобудування» – 1, за спеціальністю «113 Прикладна математика» – 2; 10 праць у матеріалах науково-практичних конференцій; 1 патент на винахід, 1 патент на корисну модель.

Ключові слова: автоматизоване проектування, механічний обробіток ґрунту, робочий орган, робоча поверхня, профіль борозни, інтегровані конструкційно-експлуатаційні геометричні моделі, дискові сошники та підгортачі, кути встановлення, структурно-параметричне формоутворення, синтез варіантів та їх оптимізація, структурні елементи, роботизовані системи, маніпулятор, математичне та комп'ютерне моделювання, економія ресурсів.

ANNOTATION

Vorobiov O. M. Modelling of design and operational geometric parameters and characteristics of mechanical disc tillage tools with the prospect of robotics. – Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in the field of knowledge «13 Mechanical Engineering» in the specialty «131 Applied Mechanics» - National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, 2026.

The relevance of the research topic is determined by the needs of theory and practice in further improving the design and operational geometric parameters and characteristics of various machines, in particular, disc tools for mechanical soil cultivation. These issues are also important at the current difficult stage of development of our state, associated with military actions on its territory. Agriculture, where disc tillage tools are the most common, plays one of the leading roles in the economy of Ukraine in these difficult times. Therefore, improving its efficiency is an urgent problem for many scientific studies.

It is known that the shape, dimensions, position and construction materials of the components of technical objects have significantly affect their design, manufacture, further operation and the quality of industrial products. Disc implements for mechanical soil cultivation, which are the subject of this dissertation research, are no exception to this rule. The outlined parameters and characteristics form the basic indicators of many relevant agricultural processes. This applies, for example, to the impact on crop yields, energy, material, financial and other costs, compliance with environmental requirements, etc.

Methods aimed at studying objects by using models similar to them instead of originals form the basis of many scientific studies. This allows us to learn about long-term and fleeting phenomena and processes within a reasonable time frame, while also saving various resources.

Models are divided into *material*, which reflect the studied properties by certain objects, substances, etc., and *informational*, which represent the objects, phenomena and processes with the necessary descriptions. Depending on the nature of the latter, linguistic, mathematical, computer and other models are distinguished. Each of them is divided into corresponding types according to their characteristics. In particular, mathematical models can be analytical, geometric, deterministic, stochastic, discrete, continuous, static, dynamic, combined (for example, graph-analytical), etc.

The rapid development of modern automated design of mechanical engineering products is largely due to achievements in the field of computer geometric modelling based on NURBS (Non-Uniform Rational B-Splines). These tools present all second-order curves and surfaces, as well as higher-order figures. This serves as the basis for the flexible reproduction of virtual solid objects through their boundary representation, in other words B-rep. In this case, a three-dimensional body is represented by boundary limits in the form of faces, edges and vertices.

A logical extension of this technology is parametric design in the environment of modern mechanical engineering CAD/CAE/CAM (Computer-Aided Design / Computer-Aided Engineering / Computer-Aided Manufacturing) systems. This allows for the flexible and productive generation of various design options for the products being developed with the aim of their comprehensive optimisation. A further generalization of this approach is the methodology of structural-parametric shaping proposed by the scientific school «Geometric Modelling of Objects, Processes and Phenomena» of the Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, which has been tested in the domestic aviation industry. The existing methods, techniques and algorithms can be successfully applied not only to the design of other machinery, such as agricultural equipment, but also properly improved, which is also the task of this study. In particular, this concerns the integration of the design and operation processes of disc

implements for mechanical soil cultivation, i.e. the corresponding stages of their life cycle. This allows improving the quality of agricultural machinery and reducing its costs.

The basis for reconciling conflicting requirements in multi-criteria optimisation of industrial products is usually geometric models that combine other models (constructional, strength, manufacturing technology, operational, etc.). Thus, the above facts demonstrate the relevance of the chosen topic of scientific research.

The dissertation was completed at the Department of Descriptive Geometry, Engineering and Computer Graphics of the National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute» within the framework of scientific and technical work «Automated Variant Geometric Modelling of Technical Objects» with state registration number 0114U0027.

The *object of the research* is the design and operation of mechanical products.

The *subject of the research* is integrated design and operational geometric models of disc coulters and hilling machines.

These scientific studies analyzed the current state of design of technical objects in mechanical engineering using the example of agricultural implements for soil cultivation and identified some promising areas for their development. In particular, this applies to disc implements, which, compared to others, are characterized by lower energy consumption in the implementation of various agricultural technologies, better preservation of the useful properties of the soil and greater compliance with existing environmental requirements. The leading place in the specified processes of automated design of computer geometric models was also demonstrated, which for other disciplines play a unifying role in reconciling existing contradictions during complex optimisation.

The priority objectives of this study were determined based on the above facts and considerations. The main goal is to develop an appropriate mathematical

apparatus for variant integrated modelling of disc implements for mechanical soil cultivation. This involves combining the design and operational geometric parameters and characteristics of the given products.

To solve the outlined problems, methods of automated modelling of technical objects, design of mechanical engineering products, soil cultivation mechanics, agricultural technologies, mathematical analysis, computational geometry, set and graph theory, optimisation, programming, computer graphics were used.

The dissertation presents a new approach to modelling such disc implements for mechanical soil cultivation as coulters and hilling machines. The proposed mathematical apparatus based on the structural-parametric methodology of shaping is presented. The appropriate models and corresponding computer implementation are considered, the applied and proposed methods, techniques and algorithms are analyzed, and directions for their further improvement are indicated. The research results have been implemented into agricultural production and the educational process of higher school. Promising directions of modelling disc implements for mechanical soil cultivation are outlined.

Scientific novelty of the dissertation results.

For the first time:

- The feasibility of using an integrated approach to modelling the design and operational geometric parameters and characteristics of disc implements for mechanical soil cultivation based on the methodology of structural-parametric shaping *was substantiated*;
- The mathematical apparatus for integrated modelling of design and operational geometric parameters and characteristics of disc coulters and hilling tools *was developed*;
- The method for controlling the resulting furrow profile using disc positioning angles based on the established corresponding analytical dependencies *was developed*;
- The conceptual design of universal double-disc coulters adapted for both conventional and narrow-row sowing *was developed*;

- The double-disc coulter design with a flexible multi-link column in the form of a robotic system with remotely controlled elements *was developed*;

- The method of restrictive estimates of the furrow profile influence on the operational energy characteristics of soil cultivation implements was developed, which was illustrated on the example of double-disc coulters.

The theory of automated variant design of mechanical engineering products *was improved* by the proposed integrated design and operational geometric models of disc implements for mechanical soil cultivation.

The methodology of structural-parametric shaping of mechanical engineering technical objects *was developed* by extending the application of the principle of integration to determine the design and operational geometric parameters and characteristics of disc coulters and hilling tools.

Thus, the significance of the research for science lies in making a certain contribution to the development of automated variant design of technical objects of mechanical engineering based on the proposed mathematical apparatus of integrated processing of design and operational geometric parameters and characteristics of disc implements for mechanical soil cultivation, and for practice – in the construction of appropriate models of these objects. The above achievements improve the quality of agricultural machinery, contribute to reducing various costs in its design, manufacture and operation, and can also be used in the creation of other similar products, for example, for demarcation, laying of roads and railways, certain networks, mining and demining, etc.

The scientific results obtained in the dissertation research *have been implemented*:

- In the Rostok farm of the Kirovograd region, Ulyanovsky district, Kamenobrodsky village council, during laboratory and field experimental studies. The design of the seed coulter was improved, which consists in the possibility of flexible adjustment of the required depth and width of the seed furrow, the angle of

inclination of its side walls in accordance with the size of the seeds. This made it possible to sow barley and corn seeds of different sizes without additional settings provided by the factory instructions. Adjusting the angles of crushing and shifting the surface layer of soil with the coulter discs of the developed design when sowing corn provides a calculated fuel saving of up to 0.15 l/ha, depending on soil and climatic conditions and the depth of seed placement. Improving the depth of seed embedding and compaction of the seed furrow bottom (seed bed) with the proposed device ensures the flow of moisture and nutrients to the seeds from below, increases the field germination of barley by 2.5%, corn – by 3% compared to the SZ-3,6A serial seeder;

– In the educational process of the National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute» in the form of methods for automated variant modelling of mechanical engineering technical objects during the teaching of the discipline «Engineering and Computer Graphics».

24 works have been published on the topic of the dissertation research. Of these: in periodical scientific publications in the specialty «131 Applied Mechanics» indexed by the Scopus database – 1; in professional scientific publications of Ukraine in the specialty «131 Applied Mechanics» – 8, in the specialty «133 Industry Mechanical Engineering» – 1, in the specialty «113 Applied Mathematics» – 2; 10 works in the materials of scientific and practical conferences; 1 patent for invention, 1 patent for a utility model.

Keywords: automated design, mechanical tillage, working body, working surface, furrow profile, integrated design and operational geometric models, disc coulters and hilling machines, installation angles, structural-parametric shaping, synthesis of options and their optimization, structural elements, robotic systems, manipulator, mathematical and computer modelling, resource saving.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

*Статті у періодичних наукових виданнях, проіндексованих
у базі даних Scopus*

1. Yablonskyi, P., Rogovskii, I., Sobczuk, H., Virchenko, G., Volokha, M., & **Vorobiov, O.** (2024). Computational approach to geometric modelling of plow bodies. *Journal of Engineering Sciences*, 11(1), E9–E18. URL: [https://www.doi.org/10.21272/jes.2024.11\(1\).e2](https://www.doi.org/10.21272/jes.2024.11(1).e2) (фахове видання категорії А, спеціальність «131 Прикладна механіка»). Особистий внесок авторів: Yablonskyi P. – розроблено математичний апарат комп'ютерного варіантного геометричного моделювання відвалів плугів; Rogovskii I. – запропоновано як об'єкт досліджень геометричне моделювання плугів; Sobczuk H. – опрацьовано питання адаптації до змінних умов проєктування робочих поверхонь; Virchenko G. – визначено мету досліджень щодо створення гнучких, продуктивних та універсальних засобів для автоматизованого формоутворення ґрунтообробних знарядь; Volokha M. – дефініція критеріїв ефективного формоутворення відвалів плугів; Vorobiov O. – аналіз досліджень і публікацій стосовно моделювання робочих поверхонь знарядь для механічного обробітку ґрунту, показано перспективність комп'ютерного варіантного формоутворення для їхнього раціонального проєктування.

Статті у наукових фахових виданнях України

2. Nikolayenko, S., Virchenko, G., Volokha, M., **Vorobiov, O.**, & Lazarchuk-Vorobiova, Y. (2025). Improving energy efficiency of double-disc coulters using boundary estimation method of seed furrow profile influence. *Machinery & Energetics*, 16(3), 20–32. URL: <https://doi.org/10.31548/machinery/3.2025.20> (фахове видання категорії А, спеціальність «131 Прикладна механіка»). Особистий внесок авторів: Nikolayenko S. – обґрунтовано актуальність наукових досліджень стосовно підвищення енергоефективності сільськогосподарських знарядь; Virchenko G. – визначено головну ідею напрацьованого методу щодо взяття за основу для подальшої оптимізації наявного досвіду експлуатації

грунтообробних знарядь у конкретних умовах; Volokha M. – сформульовано рекомендації для практичного використання отриманих результатів; Vorobiov O. – розроблено математичний апарат запропонованого методу граничних оцінок впливу профілю борозни на експлуатаційні енергетичні характеристики ґрунтообробних знарядь, який проілюстровано на прикладі дводискових сошників; Lazarchuk-Vorobiova Y. – акцентовано актуальність поширення запропонованого підходу на решту сільськогосподарських ґрунтообробних знарядь, реалізацію подальшого їхнього ефективного комп'ютерного моделювання з метою оптимізації.

3. Вірченко, Г. А., Голова, О. О., **Воробйов, О. М.**, Надкернична, Т. М., & Лазарчук-Воробйова, Ю. В. (2021). Структурно-параметрична модель поверхонь другого порядку. *Прикладна геометрія та інженерна графіка*, 100, 71–80. URL: <https://doi.org/10.32347/0131-579X.2021.100.71-80> (фахове видання категорії Б, спеціальність «131 Прикладна механіка»). Особистий внесок авторів: Вірченко Г. А. – запропоновано ідею створення узагальненої структурно-параметричної моделі поверхонь другого порядку; Голова О. О. – здійснено аналіз літературних джерел; Воробйов О. М. – розроблено математичний апарат узагальненої структурно-параметричної моделі поверхонь другого порядку; Надкернична Т. М. – оформлення статті; Лазарчук-Воробйова Ю. В. – виконано комп'ютерну побудову поверхонь.

4. Голова, О. О., Залевський, С. В., **Воробйов, О. М.**, & Лазарчук-Воробйова, Ю. В. (2021). Удосконалення геометричної форми незалежно керованого елемента маніпулятора. *Сучасні проблеми моделювання*, 21, 91–97. URL: <https://doi.org/10.33842/22195203/2021/21/91/97> (фахове видання категорії Б, спеціальність «113 Прикладна математика»). Особистий внесок авторів: Голова О. О. – запропоновано ідею вдосконалення елемента маніпулятора; Залевський С. В. – оформлення статті; Воробйов О. М. – удосконалено конструкційно-експлуатаційні параметри незалежно керованих елементів маніпулятора; Лазарчук-Воробйова Ю. В. – створення нової форми елемента маніпулятора.

5. Ванін, В. В., Вірченко, Г. А., Волоха, М. П., Яблонський, П. М., & Воробйов, О. М. (2022). До питання комп'ютерного геометричного моделювання ґрунтообробних знарядь засобами структурно-параметричного формоутворення. *Прикладна геометрія та інженерна графіка*, 103, 16–22. URL: <https://doi.org/10.32347/0131-579X.2022.103.16-22> (фахове видання категорії Б, спеціальність «131 Прикладна механіка»). Особистий внесок авторів: Ванін В. В. – аналіз літературних джерел, Вірченко Г. А. – ідея структурно-параметричного формоутворення ґрунтообробних знарядь; Волоха М. П. – оформлення статті; Яблонський П. М. – запропоновано методику комп'ютерного геометричного моделювання ґрунтообробних знарядь, проілюстровану на прикладі лап-полиць культиваторів; Воробйов О. М. – акцентовано доцільність поширення напрацьованої методики моделювання лап-полиць культиваторів на інші ґрунтообробні знаряддя.

6. Яблонський, П. М., Вірченко, Г. А., Волоха, М. П., Воробйов, О. М., & Лазарчук-Воробйова, Ю. В. (2022). До питання аналізу геометричних моделей сучасних ґрунтообробних знарядь. *Сучасні проблеми моделювання*, 24, 182–189. URL: <https://doi.org/10.33842/2313125X-2022-24-182-189> (фахове видання категорії Б, спеціальність «113 Прикладна математика»). Особистий внесок авторів: Яблонський П. М. – запропоновано спосіб інтегрованих класифікацій для автоматизованого формоутворення груп технічних об'єктів; Вірченко Г. А. – актуальність подальшого розвитку методології структурно-параметричного геометричного моделювання; Волоха М. П. – систематизація ґрунтообробних знарядь; Воробйов О. М. – аналіз досліджень і публікацій щодо моделювання сучасних знарядь для механічного обробітку ґрунту; Лазарчук-Воробйова Ю. В. – перспективи продуктивного автоматизованого генерування великої кількості структурно-параметричних різновидів опрацьовуваних виробів для підвищення ефективності їх комп'ютерного проектування.

7. Ванін, В. В., Вірченко, Г. А., Волоха, М. П., Яблонський, П. М., & Воробйов, О. М. (2023). Вплив геометричних параметрів стрілчастої лапи на енергетичні показники комбінованого культиватора-сошника. *Прикладна*

геометрія та інженерна графіка, 104, 30–37. URL: <https://doi.org/10.32347/0131-579X.2023.104.30-37> (фахове видання категорії Б, спеціальність «131 Прикладна механіка»). Особистий внесок авторів: Ванін В. В. – актуальність досліджень впливу геометричних параметрів ґрунтообробних знарядь на їхні енергетичні показники; Вірченко Г. А. – систематизація стрілочастих лап відповідно до призначення; Волоха М. П. – аналіз літературних джерел; Яблонський П. М. – розроблено комп'ютерні геометричні моделі різних типів стрілочастих лап, виконано їхню інтеграцію з належними математичними описами енергетичних показників комбінованого культиватора-сошника; Воробйов О. М. – акцентовано актуальність наукових досліджень щодо моделювання комбінованих ґрунтообробних і посівних сільськогосподарських знарядь в умовах застосування сучасної прогресивної системи землеробства No-till, тобто без оранки, за якої внесення насіння та добрив здійснюється в мінімально необхідну для цього борозну.

8. Ванін, В. В., Вірченко, Г. А., Яблонський, П. М., Лазарчук-Воробйова, Ю. В., & **Воробйов, О. М.** (2023). Модульно-геометричний підхід в автоматизованому проєктуванні виробів машинобудування. *Прикладна геометрія та інженерна графіка*, 105, 16–22. URL: <https://doi.org/10.32347/0131-579X.2023.105.16-22> (фахове видання категорії Б, спеціальність «131 Прикладна механіка»). Особистий внесок авторів: Ванін В. В. – актуальність подальшого покращення автоматизованого проєктування виробів машинобудування; Вірченко Г. А. – використання структурно-параметричної методології як основи для напрацьованого модульно-геометричного підходу; Яблонський П. М. – запропоновано деякі аспекти модульно-геометричного підходу до формоутворення технічних об'єктів у середовищі сучасних машинобудівних CAD/CAM/CAE систем; Лазарчук-Воробйова Ю. В. – концепція застосування модульно-геометричного моделювання в середовищі сучасних CAD/CAM/CAE пакетів; Воробйов О. М. – розробляння геометричних модулів машинобудівних систем автоматизованого проєктування на основі методології структурно-параметричного формоутворення.

9. Волоха, М., Яблонський, П., Лазарчук, М., Лазарчук-Воробйова, Ю., Воробйов, О., & Грубич, М. (2023). Аналіз методів і особливостей цифровізації даних польових досліджень як бази для управління рослинництвом. *Техніко-технологічні аспекти розвитку та випробування нової техніки і технологій для сільського господарства України*, 33(47), 22–34. URL: [https://doi.org/10.31473/2305-5987-2023-2-33\(47\)-2](https://doi.org/10.31473/2305-5987-2023-2-33(47)-2) (фахове видання категорії Б, спеціальність «133 Галузеве машинобудування»). Особистий внесок авторів: Волоха М. – актуальність цифровізації в галузі сільського господарства; Яблонський П. – запропоновано проаналізувати та систематизувати наявні методи цифровізації польових досліджень як бази для управління рослинництвом; Лазарчук М. – аналіз літературних джерел, розроблено науково-методичний підхід щодо підвищення ефективності машинного навчання з автоматичного розпізнавання сільсько-господарських культур, виявлення хвороб і бур'янів, прогнозування урожайності, управління водними ресурсами і ґрунтом; Лазарчук-Воробйова Ю. – оформлення статті; Воробйов О. – обґрунтовано важливість комп'ютерних інформаційних технологій для управління рослинництвом у сільському господарстві; Грубич М. – огляд методів аналізу великих даних.

10. **Vorobiov, O.** (2024). Computer modelling of basic design and operational geometrical parameters of double disc coulters. *Вісник Сумського національного аграрного університету. Серія: механізація та автоматизація виробничих процесів*, 4(58), 12–20. URL: <https://doi.org/10.32782/msnau.2024.4.2> (фахове видання категорії Б, спеціальність «131 Прикладна механіка»).

11. **Воробйов, О. М.** (2024). Комп'ютерне варіантне геометричне моделювання дводискових сошників засобами структурно-параметричного формоутворення. *Прикладна геометрія та інженерна графіка*, 107, 34–41. URL: <https://doi.org/10.32347/0131-579X.2024.107.34-41> (фахове видання категорії Б, спеціальність «131 Прикладна механіка»).

12. **Воробйов, О. М., & Лазарчук-Воробйова, Ю. В.** (2025). Застосування структурно-параметричного підходу до геометричного моделювання гнучкого маніпулятора як складової роботизованих систем. *Прикладна геометрія та*

інженерна графіка, 108, 64–71. URL: <https://doi.org/10.32347/0131-579x.2025.108.64-71> (фахове видання категорії Б, спеціальність «131 Прикладна механіка»). Особистий внесок авторів: Воробйов О. М. – розроблено структурно-параметричну модель гнучкого маніпулятора; Лазарчук-Воробйова Ю. В. – запропоновано застосування структурно-параметричної методології формування для геометричного моделювання маніпулятора.

Патенти

13. *Ванін, В. В., Воробйов, О. М., Лазарчук-Воробйова, Ю. В., Голова, О. О., Луданов, Д. К., Залевський, С. В., & Яблонський, П. М.* (2025). Гнучкий маніпулятор з дистанційним керуванням. Патент на винахід №129477. Дата публ. 07.05.2025, бюл. №19/2025. URL: <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1855235/> Особистий внесок авторів: Ванін В. В. – пропозиція запатентувати гнучкий маніпулятор з дистанційним керуванням; Воробйов О. М. – запропоновано ідею маніпулятора, напрацьовано. концептуальну його конструкцію; Лазарчук-Воробйова Ю. В. – виконано моделювання ланцюга послідовно з'єднаних взаємодіючих рухомих елементів; Голова О. О. – пошук літературних джерел; Луданов Д. К. та Залевський С. В. – оформлення патенту; Яблонський П. М. – компонування гнучкого маніпулятора.

14. *Воробйов, О. М., Вірченко, Г. А., Волоха, М. П., Яблонський, П. М., Лазарчук-Воробйова, Ю. В., Голова, О. О., Залевський, С. В., Лазарчук, М. В., & Воробйов, О. О.* (2025). Гнучка стовба дводискового сошника з дистанційним керуванням. Патент на корисну модель № 161479. Заявка u202502010. Дата заявки 01.06.2025. Патент опубліковано 10.12.2025. Бюл. № 50/2025. 6 с. URL: <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1889969/> Особистий внесок авторів: Воробйов О. М. – ідея гнучкої стовби дводискового сошника з дистанційним керуванням, розроблення її концептуальної конструкції; Вірченко Г. А та Яблонський П. М. – компонування стовби дводискового сошника; Волоха М. П. – аналіз літературних джерел; Лазарчук-Воробйова Ю. В. – моделювання V-подібних рухомих елементів; Голова О. О., Залевський С. В. та Воробйов О. О. – оформлення патенту; Лазарчук М. В. – опрацьовано з'єднань гнучкої стовби.

Апробація матеріалів дисертації

15. Ванін, В. В., Яблонський, П. М., & **Воробйов, О. М.** (2022). До питання інтегрованого комплексного геометричного моделювання ґрунтообробних знарядь. *Збірник доповідей XI міжнародної науково-практичної конференції «Прикладна геометрія, інженерна графіка та об'єкти інтелектуальної власності»* (с. 4–7). Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського. URL: <https://jagegip.kpi.ua/issue/view/15550> Особистий внесок авторів: Ванін В. В. – опрацювання літературних джерел; Яблонський П. М. – на основі розроблених інтегрованих комплексних способів геометричного моделювання окреслено напрямки напрацювання нових методик і прийомів комп'ютерного структурно-параметричного формоутворення ґрунтообробних знарядь, удосконалення відповідного методичного, інформаційного та програмного забезпечення CAD/CAM/CAE систем; Воробйов О. М. – визначено ряд задач щодо практичного впровадження проаналізованого інтегрованого комплексного геометричного моделювання знарядь для механічного обробітку ґрунту.

16. **Воробйов, О. М.,** & Яблонський, П. М., (2022). Аналіз сучасного стану геометричного моделювання ґрунтообробних знарядь. *Тези доповідей 24 міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні проблеми геометричного моделювання»*. (с. 10). Запоріжжя: МДПУ. URL: <http://magazine.mdpu.org.ua/index.php/spm/issue/view/121/26> Особистий внесок авторів: Воробйов О. М. – на основі виконаного аналізу наявних засобів геометричного моделювання ґрунтообробних знарядь визначено деякі напрямки подальшого розвитку відповідних способів, прийомів та алгоритмів формоутворення; Яблонський П. М. – обґрунтовано можливість і доцільність поширення методології структурно-параметричного формоутворення на розв'язання типових задач проєктування сільськогосподарської техніки.

17. Вірченко, Г. А., Волоха, М. П., Яблонський, П. М., **Воробйов, О. М.,** Голова, О. О., Лазарчук-Воробйова, Ю. В. (2023). Комп'ютерне геометричне моделювання ґрунтообробних знарядь засобами структурно-параметричного

формоутворення. *Збірник тез доповідей XVII міжнародної науково-практичної конференції «Обухівські читання»* (с. 39–42). Київ: НУБіП України URL: https://nubip.edu.ua/sites/default/files/u231/obuhovski_chitannya_2023.pdf Особистий внесок авторів: Вірченко Г. А. – визначення актуальності для економіки України подальшого підвищення ефективності сільського господарства; Волоха М. П. – опрацювання літературних джерел; Яблонський П. М. – розроблено інтегровану структурно-параметричну варіантну комп'ютерну геометричну модель лапи-полиці для її комплексної оптимізації; Воробйов О. М. – запропоновано поширення наведеної методики моделювання лап-полиць культиваторів на інші знаряддя для механічного обробітку ґрунту; Голова О. О. – оформлення тез; Лазарчук-Воробйова Ю. В. – акцентовано певну схожість формоутворення розглянутих виробів і необхідність на основі цього розробляння належних нових способів, прийомів та алгоритмів комп'ютерного структурно-параметричного геометричного моделювання.

18. Ванін, В. В., Вірченко, Г. А., Волоха, М. П., Яблонський, П. М., **Воробйов, О. М.**, & Лазарчук-Воробйова, Ю. В. (2023). Удосконалення конструкції комбінованого лапового культиватора-сошника. *Збірник доповідей XII міжнародної науково-практичної конференції «Прикладна геометрія, інженерна графіка та об'єкти інтелектуальної власності»* (с. 4–7). Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського. URL: <https://jagegip.kpi.ua/article/view/281597> Особистий внесок авторів: Ванін В. В. та Лазарчук-Воробйова Ю. В. – опрацювання літератури; Вірченко Г. А. – оформлення тез; Волоха М. П. – визначення актуальності обраної теми досліджень; Яблонський П. М. – удосконалено конструкцію лапового культиватора-сошника з метою зниження тягового опору та підвищення якості сівби; Воробйов О. М. – розроблено компоновальну схему запропонованого лапового культиватора-сошника.

19. Вірченко, Г. А., Волоха, М. П., Яблонський, П. М., **Воробйов, О. М.**, Голова, О. О., & Лазарчук-Воробйова, Ю. В. (2024). Геометричне моделювання поверхонь стрілчастих лап засобами структурно-параметричного формоутворення. *Збірник тез доповідей XVIII міжнародної науково-практичної конференції*

«Обухівські читання» (с. 43–46). Київ: НУБіП України. URL: https://nubip.edu.ua/sites/default/files/u231/obuhovski_chitannya_2024_tezi_3_4.pdf
Особистий внесок авторів: Вірченко Г. А. – дефініція тематики дослідження; Волоха М. П. – аналіз літературних джерел; Яблонський П. М. – розроблено узагальнені геометричні моделі стрілчастих лап на основі поверхонь Кунса; Воробйов О. М. – визначено проміжки змінювання геометричних параметрів плоскорізальних та універсальних лап; Голова О. О. – оформлення тез; Лазарчук-Воробйова Ю. В. – перспективи подальших досліджень.

20. Яблонський, П. М., Вірченко, Г. А., Роговський, І. Л., Волоха, М. П., & Воробйов, О. М. (2024). Варіантні комп'ютерні геометричні моделі відвалів полицевого плуга. *Матеріали XIV міжнародної науково-практичної конференції «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем»* (Т. 1, с. 76–78). Чернігів: НУ «Чернігівська політехніка». URL: https://drive.google.com/file/d/1s2IU7CHhsXHLKxCXEVMEM_AxquSi6b0q/view
Особистий внесок авторів: Яблонський П. М. – визначено основи запропонованого комп'ютерного варіантного геометричного моделювання відвалів полицевих плугів; Вірченко Г. А. та Роговський І. Л. – дефініція наукової тематики; Волоха М. П. – опрацювання літератури; Воробйов О. М. – показано, що основою комп'ютерного геометричного моделювання в сучасних системах автоматизованого проєктування є математичний апарат NURBS.

21. Вірченко, Г. А., Волоха, М. П., Яблонський, П. М., Воробйов, О. М., & Лазарчук-Воробйова, Ю. В. (2024). Комп'ютерне варіантне формоутворення стрілчастих лап. *Збірник доповідей XIII міжнародної науково-практичної конференції «Прикладна геометрія, інженерна графіка та об'єкти інтелектуальної власності»* (с. 4–7). Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського. URL: <https://jagegip.kpi.ua/article/view/309760>
Особистий внесок авторів: Вірченко Г. А. та Волоха М. П. – обрання теми наукових розвідок; Яблонський П. М. – запропоновано інтегровану методику комп'ютерного геометричного моделювання, яка поєднує етап варіантного опрацювання робочих поверхонь і стадію автоматизованого конструювання стрілчастих лап; Воробйов О. М. та

Лазарчук-Воробйова Ю. В. – виконано аналіз досліджень і публікацій стосовно комп'ютерного варіантного формоутворення стрілчастих лап.

22. Вірченко, Г. А., Волоха, М. П., Яблонський, П. М., **Воробйов, О. М., & Лазарчук-Воробйова, Ю. В.** (2025). Моделювання профілю борозни залежно від діаметра та кутів встановлення ґрунтообробного диска. *Збірник тез доповідей XIX міжнародної науково-практичної конференції «Обухівські читання»* (с. 19–23). Київ: НУБіП України. URL: https://nubip.edu.ua/sites/default/files/u231/1obuhovski_chitannya_2025_tezi.pdf Особистий внесок авторів: Вірченко Г. А. та Волоха М. П. – дефініція опрацьовуваної тематики; Яблонський П. М. – виконано моделювання профілю борозни; Воробйов О. М. – визначено перспективи досліджень стосовно уточнення отриманих результатів шляхом їхнього корегування в залежності від наявних конкретних обставин використання, зокрема, типу ґрунту, його фізико-хімічного стану, швидкості обробітку тощо; Лазарчук-Воробйова Ю. В. – оформлення тез.

23. Вірченко, Г. А., Яблонський, П. М., **Воробйов, О. М., & Лазарчук-Воробйова, Ю. В.** (2025). Гнучкий маніпулятор з дистанційним керуванням як компонент роботизованої системи знарядь для механічного обробітку ґрунту. *Збірник доповідей XIV міжнародної науково-практичної конференції «Прикладна геометрія, інженерна графіка та об'єкти інтелектуальної власності»* (с. 33–36). Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського. URL: <https://doi.org/10.20535/ngikg2025.XIV.332184> Особистий внесок авторів: Вірченко Г. А. та Яблонський П. М. – визначення актуальності роботизації в галузі сільського господарства; Воробйов О. М. – запропоновано застосування гнучкого маніпулятора з дистанційним керуванням як компонента роботизованої системи знарядь для механічного обробітку ґрунту; Лазарчук-Воробйова Ю. В. – опрацювання літератури.

24. Вірченко, Г. А., Яблонський, П. М., **Воробйов, О. М., & Лазарчук-Воробйова, Ю. В.** (2025). Гнучкий маніпулятор з дистанційним керуванням: сучасні підходи до роботи в екстремальному середовищі. *Тези доповідей 27 міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні проблеми*

геометричного моделювання» (с. 12). Запоріжжя: МДПУ. URL: <https://magazine.mdpu.org.ua/index.php/spm/issue/view/133/60> Особистий внесок авторів: Вірченко Г. А. та Яблонський П. М. – дефініція теми публікації; Воробйов О. М. та Лазарчук-Воробйова Ю. В. – запропоновано застосування розробленого гнучкого маніпулятора з дистанційним керуванням для використання в небезпечних середовищах.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	28
ВСТУП.....	29
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ПРОЄКТУВАННЯ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ ҐРУНТООБРОБНИХ ЗНАРЯДЬ	37
1.1. Огляд літературних джерел	37
1.1.1. Загальні питання створення сільськогосподарської техніки та ґрунтообробних знарядь, подальшого підвищення їхньої якості..	37
1.1.2. Конструювання та експлуатація дискових знарядь для механічного обробітку ґрунту	41
1.2. Геометричне моделювання як базова складова процесів проектування, виготовлення та експлуатації технічних об'єктів машинобудування.....	45
1.3. Структурно-параметричне формоутворення – прогресивний напрямок сучасного автоматизованого проектування	49
1.4. Мета та завдання дисертаційного дослідження.....	52
Висновки до розділу 1	54
РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНІ ЗАСАДИ ГЕОМЕТРИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ДИСКОВИХ ЗНАРЯДЬ ДЛЯ МЕХАНІЧНОГО ОБРОБІТКУ ҐРУНТУ	56
2.1. Запропонована концепція	56
2.2. Узагальнена модель формоутворення робочих поверхонь дисків	65
2.3. Метод граничних оцінок впливу профілю борозни на експлуатаційні енергетичні характеристики ґрунтообробних знарядь	74
Висновки до розділу 2	80
РОЗДІЛ 3. МОДЕЛЮВАННЯ ДВОДИСКОВИХ СОШНИКІВ	82
3.1. Концептуальна конструкція універсальних дводискових сошників...	82
3.2. Керування отримуваним профілем борозни за допомогою кутів позиціонування дисків	88
3.2.1. Математичний апарат	88

3.2.2. Конкретні приклади.....	97
3.3. Оптимізація конструкційно-експлуатаційних геометричних параметрів і характеристик.....	102
Висновки до розділу 3	113
РОЗДІЛ 4. ФОРМОУТВОРЕННЯ ДИСКОВИХ ПІДГОРТАЧІВ	115
4.1. Елементи концептуальної конструкційної схеми.....	115
4.2. Математичний апарат побудови профілів борозни.....	121
4.3. Практичні приклади.....	127
4.3.1. Керування профілем борозни	127
4.3.2. Комп'ютерні твердотільні моделі	137
Висновки до розділу 4	141
РОЗДІЛ 5. ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШОГО РОЗВИТКУ ДИСКОВИХ ЗНАРЯДЬ ДЛЯ МЕХАНІЧНОГО ОБРОБІТКУ ҐРУНТУ	143
5.1. Актуальність автоматизації в умовах сучасного суспільства.....	143
5.2. Роботизація дискових знарядь для механічного обробітку ґрунту в сільському господарстві	145
5.3. Дводисковий сошник із гнучкою дистанційно-керованою багатоланковою стовбою.....	148
5.3.1. Гнучкий маніпулятор з дистанційним керуванням.....	148
5.3.2. Сошник із гнучкою дистанційно-керованою стовбою	154
5.4. Напрямки розвитку дискових ґрунтообробних знарядь в інших галузях життєдіяльності	159
Висновки до розділу 5	161
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	163
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	167
ДОДАТОК А. ПРИКЛАДИ РЕАЛІЗАЦІЇ ЗАПРОПОНОВАНОГО ПІДХОДУ .	190
A.1. Комп'ютерне варіантне моделювання дисків	190
A.1.1. Робочі поверхні	190
A.1.2. Концептуальні твердотільні моделі	192

А.2. Дводискові сошники	194
А.2.1. Варіантне моделювання профілів борозни	194
А.2.2. Комп'ютерне конструювання.....	202
А.3. Дисккові підгортачі.....	207
А.3.1. Профілі борозни.....	207
А.3.2. Комп'ютерне твердотільне конструювання.....	209
А.4. Отримані патенти	211
ДОДАТОК Б. ДОКУМЕНТИ ПРО ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	
	216
ДОДАТОК В. СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ.....	
	219

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

СПГМ – структурно-параметрична графова модель;

CAD (Computer-Aided Design) – комп'ютерне конструювання;

CAE(Computer-Aided Engineering) – комп'ютерні інженерні розрахунки;

CAM (Computer-Aided Manufacturing) – комп'ютерне виробництво;

NURBS (Non-Uniform Rational B-Splines) – неоднорідні раціональні базисні сплайни.

ВСТУП

Обґрунтування вибору теми дослідження. Актуальність виконаних наукових розвідок спричинена потребами теорії та практики в подальшому вдосконаленні конструкційно-експлуатаційних параметрів і характеристик різноманітних машин, зокрема дискових знарядь для механічного обробітку ґрунту. Зазначені завдання особливо важливі на нинішньому важкому етапі розвитку нашої держави, пов'язаному з воєнними діями на її території. У цей нелегкий час сільське господарство, де дискові знаряддя для обробітку ґрунту найбільш розповсюджені, є однією з провідних галузей економіки України. Тому покращення його ефективності становить актуальну проблему для багатьох наукових досліджень.

Загальновідомо, що форма, розміри та положення складових технічних об'єктів суттєво впливають на проєктування, виготовлення й експлуатацію промислової продукції. Це цілком стосується також сільськогосподарських дискових знарядь для механічного обробітку ґрунту, яким присвячено дану дисертацію. Окреслені аспекти значною мірою формують базові показники відповідних аграрних технологій. Наприклад, впливають на врожайність рослинних культур, енергетичні, матеріальні, фінансові та інші витрати, дотримання екологічних вимог і т. д.

Наукові методи, спрямовані на вивчення об'єктів, явищ та процесів шляхом використання моделей, становлять основу багатьох досліджень. Останнє обумовлено тим, що моделювання дозволяє якісно вивчати доволі тривалі та швидкоплинні явища і процеси в належні терміни, суттєво економити при цьому всілякі ресурси.

Стрімкий розвиток сучасного автоматизованого проєктування продукції машинобудування багато в чому обумовлений досягненнями у сфері комп'ютерного геометричного моделювання на основі неоднорідних раціональних базисних сплайнів. Дані засоби дозволяють визначати в уніфікованому вигляді всі криві та поверхні другого порядку, а також фігури вищих степенів. Це забезпечує гнучке формоутворення різноманітних

віртуальних твердотільних об'єктів завдяки граничному представленню, відомому як В-гер методологія, що подає тіла обмежувачими їхніми границями у вигляді граней, ребер і вершин.

Подальший розвиток наведеної технології становить параметричне конструювання в середовищі сучасних машинобудівних CAD/CAE/CAM (Computer-Aided Design / Computer-Aided Engineering / Computer-Aided Manufacturing) систем. Це дозволяє продуктивно створювати чисельні варіанти проєктованих виробів і процесів з метою їхньої комплексної оптимізації. Узагальненням описаного підходу є запропонована науковою школою «Геометричного моделювання об'єктів, процесів та явищ» КПІ ім. Ігоря Сікорського методологія структурно-параметричного формоутворення, яка апробована у вітчизняній авіаційній галузі. Наявні способи, прийоми та алгоритми можуть бути не тільки використані для проєктування іншої техніки, наприклад сільськогосподарської, а й певним чином удосконалені, що також являє собою завдання даного наукового дослідження. Зокрема, це стосується інтеграції процесів проєктування та експлуатації дискових знарядь для механічного обробітку ґрунту, тобто відповідних етапів їхнього життєвого циклу. Зазначене дозволяє покращувати якість сільськогосподарської техніки, знижувати витрати на неї. У багатьох випадках під час комплексної оптимізації промислової продукції узгодження різних суперечливих вимог забезпечують геометричні моделі, що ефективно поєднують поміж собою інші застосовувані моделі.

Таким чином, проаналізованими вище фактами та обставинами обумовлено актуальність опрацьовуваних наукових завдань, які визначили обрану тему даних наукових досліджень.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертацію виконано на кафедрі нарисної геометрії, інженерної та комп'ютерної графіки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» в рамках науково-технічної роботи «Автоматизоване варіантне геометричне моделювання технічних об'єктів» із державним номером реєстрації 0114U002701.

Об'єктом дослідження є проектування та експлуатація механічних виробів.

Предмет дослідження становлять інтегровані конструкційно-експлуатаційні геометричні моделі дискових сошників і підгортачів.

Мета та завдання дослідження полягають у напрацюванні належного математичного апарату для інтегрованого варіантного моделювання конструкційно-експлуатаційних геометричних параметрів і характеристик дискових знарядь для механічного обробітку ґрунту.

Для досягнення поставленої мети визначено наступні завдання.

1. *Проаналізувати* сучасний стан проектування сільськогосподарських ґрунтообробних знарядь, окреслити перспективи їхнього подальшого вдосконалення.

2. *Обґрунтувати* доцільність використання інтегрованого підходу до моделювання конструкційно-експлуатаційних геометричних параметрів та характеристик дискових знарядь для механічного обробітку ґрунту на засадах методології структурно-параметричного формоутворення.

3. *Розробити* математичний апарат інтегрованого моделювання конструкційно-експлуатаційних геометричних параметрів і характеристик дискових сошників та підгортачів.

4. *Розробити* спосіб керування отримуваним профілем борозни за допомогою кутів позиціонування дисків на основі встановлених відповідних аналітичних залежностей.

5. *Напрацювати* концептуальну конструкцію універсальних дводискових сошників, пристосованих для здійснення як звичайної, так і вузькорядної сівби.

6. *Розробити* конструкцію дводискового сошника з гнучкою багатоланковою стовбою у вигляді роботизованої системи з дистанційно-керованими елементами.

7. *Розробити* метод граничних оцінок впливу профілю борозни на експлуатаційні енергетичні характеристики ґрунтообробних знарядь, який проілюструвати на прикладі дводискових сошників.

8. *Удосконалити* теорію автоматизованого варіантного проектування виробів машинобудування запропонованими інтегрованими конструкційно-

експлуатаційними геометричними моделями дискових знарядь для механічного обробітку ґрунту.

9. *Упровадити* отримані наукові результати виконаного дисертаційного дослідження у практику.

10. *Визначити* напрямки подальшого розвитку запропонованого підходу до моделювання конструкційно-експлуатаційних геометричних параметрів і характеристик дискових знарядь для механічного обробітку ґрунту.

Методи дослідження. Для виконання поставлених завдань використовувалися методи автоматизованого проєктування технічних об'єктів, конструювання продукції машинобудування, ґрунтообробної механіки, аграрних технологій, математичного аналізу, обчислювальної геометрії, теорії множин і графів, оптимізації, програмування, комп'ютерної графіки.

Методи *автоматизованого проєктування технічних об'єктів* застосовувалися для забезпечення можливості ефективної адаптації запропонованого підходу, розроблених способів і прийомів до середовища різноманітних сучасних систем автоматизованого проєктування. Це стосується *параметричного конструювання*, яке реалізує побудову гнучких геометричних моделей, що легко модифікуються необхідним чином; *генеративного проєктування*, яке дозволяє продуктивно створювати потрібні варіанти опрацьовуваних об'єктів і процесів; *модульного підходу*, спрямованого на уніфікацію проєктних процедур для успішного об'єднання окремих компонентів у загальну систему; *інтеграції CAD/CAE/CAM* пакетів.

Методологія *конструювання продукції машинобудування* використовувалися для врахування зазначених особливостей щодо модельованих параметрів і характеристик дискових знарядь для механічного обробітку ґрунту. Мається на увазі вирішення таких питань, як аналіз існуючих вимог до опрацьовуваних технічних об'єктів та потрібних їхніх властивостей, виконання належних розрахунків, створення відповідних комп'ютерних твердотільних моделей.

Для правильного моделювання конструкційно-експлуатаційних параметрів та характеристик дискових знарядь було взято до уваги існуючі прогресивні *методи ґрунтообробної механіки та аграрних технологій*. Зокрема, щодо підвищення врожайності сільськогосподарських культур, зниження потреб у різноманітних ресурсах, дотримання екологічних вимог. Таким інноваційним підходом є обробіток ґрунту без оранки (no-till), тобто без його суттєвого перевертання, а тільки шляхом незначного поверхневого розпушування. Мінімальний механічний вплив дозволяє зберігати вологу і структуру ґрунту, запобігати його ерозії, зменшувати енергетичні, матеріальні, фінансові та інші витрати, сприяє знищенню бур'янів, доступу повітря й води до кореневої системи культивованих рослин. Усе це забезпечує якісні умови для їхнього вирощування.

Методи *математичного аналізу, обчислювальної геометрії, теорії множин і графів, оптимізації, програмування та комп'ютерної графіки* використовувались під час безпосереднього моделювання конструкційно-експлуатаційних параметрів і характеристик дискових знарядь для механічного обробітку ґрунту, напрацювання належного аналітичного математичного апарату. Це стосується запропонованого способу керування отримуваним профілем борозни за допомогою кутів встановлення дисків, розробленого методу граничних оцінок впливу профілю борозни на експлуатаційні енергетичні характеристики ґрунтообробних знарядь.

Взаємне доповнення наявних спроможностей зазначених вище методологій дозволило реалізувати їхнє системне застосування для досягнення визначеної мети та виконання поставлених у даному дисертаційному дослідженні завдань, забезпечило достовірність одержаних результатів і висновків. Інформаційною базою проведених розвідок є праці [1–180] вітчизняних та закордонних учених, відповідних фахівців.

Наукова новизна отриманих результатів.

Уперше:

– *обґрунтовано* доцільність використання інтегрованого підходу до моделювання конструкційно-експлуатаційних геометричних параметрів та

характеристик дискових знарядь для механічного обробітку ґрунту на засадах методології структурно-параметричного формоутворення;

- *розроблено* математичний апарат інтегрованого моделювання конструкційно-експлуатаційних геометричних параметрів і характеристик дискових сошників та підгортачів;

- *розроблено* спосіб керування отримуваним профілем борозни за допомогою кутів позиціонування дисків на основі встановлених відповідних аналітичних залежностей;

- *напрацьовано* концептуальну конструкцію універсальних дводискових сошників, пристосованих для здійснення як звичайної, так і вузькорядної сівби;

- *розроблено* конструкцію дводискового сошника з гнучкою багатоланковою стовбою у вигляді роботизованої системи з дистанційно-керованими елементами;

- *розроблено* метод граничних оцінок впливу профілю борозни на експлуатаційні енергетичні характеристики ґрунтообробних знарядь, який проілюстровано на прикладі дводискових сошників.

Удосконалено теорію автоматизованого варіантного проєктування виробів машинобудування запропонованими інтегрованими конструкційно-експлуатаційними геометричними моделями дискових знарядь для механічного обробітку ґрунту.

Отримала подальший розвиток методологія структурно-параметричного формоутворення технічних об'єктів машинобудування шляхом розширення застосування принципу інтеграції на визначення конструкційно-експлуатаційних геометричних параметрів і характеристик дискових сошників та підгортачів.

Практичне значення отриманих результатів полягає в забезпеченні актуальних потреб в інтегрованих моделях конструкційно-експлуатаційних геометричних параметрів і характеристик дискових знарядь для механічного обробітку ґрунту з метою їхньої комплексної оптимізації. Це дозволяє покращувати якість сільськогосподарської техніки, зменшувати матеріальні,

енергетичні, фінансові та інші витрати під час усього її життєвого циклу, підвищувати різноманітні аграрні й екологічні показники. Також отримані здобутки можуть бути застосовані при створенні інших схожих виробів, наприклад, для демаркації територій, прокладання автомобільних і залізничних шляхів, певних мереж, мінування та розмінування тощо.

Напрацьовані наукові результати впроваджено:

- у фермерському господарстві «Росток» Кіровоградської області Уляновського району Кам'янобрідської сільської ради під час лабораторно-польових експериментальних досліджень. Було вдосконалено конструкцію стовби сошника сівалки, що полягає в можливості гнучкого налаштування потрібної глибини та ширини посівної борозни, кута нахилу її бокових стінок відповідно до розмірів насіння. Це дозволило здійснювати якісний висів різного за розмірами насіння ячменю й кукурудзи без додаткових, передбачених заводськими інструкціями налаштувань. Регулювання кутів кришення і зсуву поверхневого шару ґрунту дисками сошника розробленої конструкції при сівбі кукурудзи забезпечує розрахункову економію пального до 0,15 л/га залежно від ґрунтово-кліматичних умов та глибини внесення насіння. Покращення загортання насіння та ущільнення дна посівної борозни (насіннєвого ложа) запропонованим пристроєм обумовлює підтік води й поживних речовин до насіння знизу, що підвищує польову схожість ячменю на 2,5 %, кукурудзи на 3 % в порівнянні з серійною сівалкою СЗ-3,6А;

- у навчальний процес Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» у вигляді методик автоматизованого варіантного моделювання технічних об'єктів машинобудування під час викладання дисципліни «Інженерна та комп'ютерна графіка».

Особистий внесок здобувача. Усі положення, що виносяться на захист і складають наукову новизну отримано особисто автором даного дослідження. У виданнях за участю співавторів одержані здобувачем результати наведено у списку його публікацій за темою дисертації.

Апробація матеріалів дисертації. Матеріали виконаного дослідження доповідалися на 10 конференціях, а саме: XI–XIV міжнародній науково-практичній конференції «Прикладна геометрія, інженерна графіка та об’єкти інтелектуальної власності» (м. Київ, 2022 р., 2023 р., 2024 р., 2025 р.); 24 міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні проблеми геометричного моделювання» (м. Запоріжжя, 2022 р., 2025 р.); XVII–XIX міжнародній науково-практичній конференції «Обухівські читання» (м. Київ, 2023 р., 2024 р., 2025 р.); XIV міжнародній науково-практичній конференції «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем» (Чернігів, 2024 р.).

Публікації. За темою дисертаційного дослідження опубліковано 24 роботи. З них: у періодичних наукових виданнях за спеціальністю «131 Прикладна механіка», що індексуються базою даних Scopus, – 1; у фахових наукових виданнях України за спеціальністю «131 Прикладна механіка» – 8, за спеціальністю «133 Галузеве машинобудування» – 1, за спеціальністю «113 Прикладна математика» – 2; 10 праць у матеріалах науково-практичних конференцій; 1 патент на винахід, 1 патент на корисну модель.

Структура та обсяг дисертації. Робота складається зі вступу, п’яти розділів, загальних висновків, списку використаних джерел із 180 найменувань та 3 додатків. Повний обсяг дисертації (з анотаціями) становить 229 сторінок, містить 86 рисунків, 8 таблиць. Основна частина – 142 сторінки, список використаних джерел – 22 сторінки, додатки – 41 сторінка.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ПРОЄКТУВАННЯ

СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ ҐРУНТООБРОБНИХ ЗНАРЯДЬ

У першому розділі дисертації здійснено аналіз нинішнього стану проєктування сільськогосподарських знарядь для механічного обробітку ґрунту, в тому числі й дискових, як найбільш прогресивних із точки зору забезпечення наявних екологічних та економічних вимог на теперішньому етапі розвитку аграрних технологій. Наведені факти підтверджено належними посиланнями на відповідні літературні джерела. Було показано, що геометричне моделювання являє собою базову складову процесів проєктування, виготовлення та експлуатації різноманітної продукції машинобудування. Акцентовано перспективність для ефективного створення технічних об'єктів методології комп'ютерного структурно-параметричного формоутворення. На основі вказаних відомостей визначено мету та завдання цього дисертаційного дослідження.

1.1. Огляд літературних джерел

Опрацьовану літературу в даному підрозділі подано двома пунктами, що присвячені відповідно: загальним питанням створення сільськогосподарської техніки, ґрунтообробним знаряддям, підвищенню їхньої якості; завданням ефективного конструювання та експлуатації дискових засобів для механічного обробітку ґрунту.

1.1.1. Загальні питання створення сільськогосподарської техніки та ґрунтообробних знарядь, подальшого підвищення їхньої якості

У дослідженні [41], яке систематизує наукові основи формування техніко-технологічного забезпечення аграрних підприємств, проаналізовано особливості сучасного вирощування різних сільськогосподарських культур, акцентовано увагу на раціональному комплектуванні й оновленні відповідної матеріально-

технічної бази, необхідності інтенсивного впровадження інновацій. Зазначено, що якісне технічне забезпечення становить головний фактор сталого розвитку агропромислового виробництва. Першочерговими напрямками перспективних конструкцій сільськогосподарської техніки має бути багатофункціональність технологічних знарядь, широке застосування засобів автоматизації. Нині на передній план агроінженерних досліджень виходять завдання енергозбереження та мінімізації негативного впливу на довкілля. Це значною мірою реалізується використовуваною системою землеробства. У виданні [42] визначаються належні вимоги до засобів механічного обробітку ґрунту, а в дослідженнях [43, 44] наведено оцінки енергетичних показників ґрунтообробних агрегатів та рекомендації стосовно підбору їхніх робочих органів. Пріоритетним напрямком інноваційного розвитку сільського господарства присвячено статті [107, 162].

Питання проектування та експлуатації різноманітних ґрунтообробних і посівних сільськогосподарських машин розлого викладено у виданнях [5, 27, 62]. Це стосується плугів, культиваторів, сівалок і т. д. (див. рис. 1.1).

Також у літературі опрацьовуються задачі визначення раціонального складу і швидкісних режимів експлуатації машинних агрегатів [2]; методів моделювання засобів механізації обробітку ґрунту [28]; застосування гвинтових робочих органів зі щіткоподібною еластичною робочою поверхнею [36]; впливу розміщення секцій агрегату смугового обробку ґрунту на тяговий опір та витрати палива [47]; методичних засад визначення ефективності техніки під час обробітку ґрунту, внесення добрив і сівби за енергетичними показниками [48]; методик проектування сільськогосподарських машин [57]; екологізації механічного обробітку ґрунту [64]; формування тяговошвидкісних властивостей тракторів загального призначення та їхньої адаптації до природних умов обробітку ґрунту [73, 74]; використання САД програм при проектуванні сільськогосподарських машин [79]; аналізу діючих навантажень у машинах для обробітку ґрунту [88]; розробки комплексних техніко-технологічних заходів підвищення працездатності сільськогосподарських машин [89]; впливу

*а**б**в**г**д**е*

Рис. 1.1. Приклади ґрунтообробних і посівних знарядь [97]:

а, б – плуг ярусний та плуг-луцильник; *в, г* – чизельний та комбінований агрегат;
д – культиватор; *е* – зернова сівалка

цифрових технологій на аграрне виробництво [90]; ролі сучасних технологій у забезпеченні сталого розвитку сільського господарства шляхом оптимізації процесів посіву [91]; проектування, виробництва та конструкційних особливостей нової сільськогосподарської техніки [97]; формування конструкційних параметрів ґрунтообробних машин методами фізичного моделювання [98];

впровадження технологій раціонального використання природних та енергетичних ресурсів [110]; комп'ютеризації сільськогосподарської галузі [122]; продуктивності безвідвальних сошників, огляду геометрії цих знарядь, їхньої взаємодії з ґрунтом і рослинними залишками [125]; світової продовольчої безпеки [126, 135, 156]; польових досліджень енергії подрібнення ґрунту різними відвалами за багатоманітних умов експлуатації [127]; впливу типів відвалів, глибин обробітку ґрунту та швидкостей трактора на деякі фізичні властивості та подрібнення ґрунту [138]; побудови робочих поверхонь корпусів ґрунтообробних шнеків із відсіків розгортних гелікоїдів [144]; визначення раціональної форми барабанних робочих органів для поверхневого обробітку ґрунту [151]; оцінки ефективності різних сошників для механічного обробітку ґрунту [152]; геометричного моделювання осі S-подібного підйомника лапи культиватора [153]; інженерних принципів створення сільськогосподарських машин [161]; проєктування робочих органів ґрунтообробних знарядь з використанням методів біоніки [167].

У статтях [53, 75, 109] акцентовано актуальність на нинішньому етапі розвитку суспільства широкого впровадження мінімального механічного обробітку ґрунту для збереження родючості землі, зменшення негативних впливів на навколишнє середовище та енергетичних витрат. В окресленому плані, порівняно з полицевими й чизельними, більш перспективними є дискові ґрунтообробні знаряддя. Це обумовило їхнє обрання в якості предмета даного дисертаційного дослідження.

Таким чином, у цьому пункті на підставі проаналізованих літературних джерел визначено основні сучасні прогресивні напрямки створення ґрунтообробної сільськогосподарської техніки та подальшого покращення її якості. Маються на увазі питання забезпечення високої продуктивності, надійності, економічності, відповідності екологічним вимогам. Для успішного вирішення окреслених задач пропонується реалізовувати багатофункціональність аграрних знарядь, широко впроваджувати засоби комп'ютеризації та роботизації, удосконалювати технологічні режими

аграрного виробництва. В останньому випадку мається на увазі визначення раціонального складу використовуваних машинних агрегатів, оптимальних швидкостей їхнього експлуатаційного руху, глибин механічного обробітку ґрунту, отримуваних при цьому профілів борозни, діючих навантажень тощо.

1.1.2. Конструювання та експлуатація дискових знарядь для механічного обробітку ґрунту

Безпосередньо багатоаспектному проєктуванню дискових ґрунто-обробних знарядь (див. рис. 1.2) присвячено видання [45, 46, 105], в яких здійснено аналіз їхньої конструкції, досліджено взаємодію цих робочих органів із ґрунтом, опрацьовано функціональні зв'язки їхніх геометричних форм та режимів експлуатації.

*а**б*

Рис. 1.2. Приклади дискових ґрунтообробних знарядь [97]:

а – плуг; *б* – борона

Також у літературних джерелах розглядаються питання стійкості руху дискових борін [1]; автоматизованого моделювання дискових робочих органів [13]; умов працездатності сферичних дисків при взаємодії з ґрунтом [30]; раціонального визначення величин параметрів пружних стояків дискових ґрунтообробних агрегатів [35]; дослідження коефіцієнта корисної дії дискової борони зі сферичним диском [39]; застосування теорії подібності для визначення параметрів та режимів роботи дискової борони для механічного обробітку ґрунту [40]; ефективності застосування дискових борін і агрегатів у господарствах різного типу [52]; впливу параметрів дискових сошників на передавальну здатність прорізання пожнивних решток у системі мінімального обробітку ґрунту [53]; аналізу конструкцій сошників посівних машин [58]; дискових робочих органів комбінованого способу обробітку ґрунту [65]; технологічних особливостей виготовлення дискових ґрунтообробних та посівних машин [70]; визначення зон деформації ґрунту дисковими знаряддями [87]; обґрунтування схеми, параметрів і режимів експлуатації дискового плуга [94]; конструкційно-технологічних параметрів дискатора з пружними стійками [96]; впливу конструкційних та кінематичних параметрів дискового плуга на тяговий опір, якість розпушення ґрунту [104]; багатофункціональних комбінованих ґрунтообробних знарядь [116]; моделювання методом дискретних елементів дискових сошників [123] та їхніх натурних випробувань [124]; експериментальних досліджень опору сферичного робочого органу дискової борони [130]; прогнозування діючих сил на дискові інструменти й зони порушення ґрунту за допомогою нечіткої логіки [131]; проєктування та оптимізації параметрів дводискового траншейного пристрою для екологічних чайних плантацій [132]; впливу ґрунтообробного обладнання у вигляді пружинного культиватора й дискової борони, властивостей ґрунту, швидкості руху та глибини обробітку на витрату палива, якість агротехнічних результатів [133]; математичного моделювання рівномірного посіву зернових культур дводисковим сошником [134]; впливу конфігурацій дискових сошників на продуктивність посіву за різної щільності покриття пожнивними залишками [139]; прогнозування сил дискової системи висіву з використанням

аналітичного та дискретно-елементного методу [142]; комбінованої дії дискових ножів і робочих швидкостей на порушення ґрунту та зрізання рослинних залишків за системи безвідвального обробітку ґрунту [145]; впливу диска та кута його нахилу в сошнику сівалки на розподіл пожнивних залишків і профіль борозни [146]; дослідження залежностей деяких технічних показників комплексного знаряддя від глибини обробітку ґрунту та кута нахилу дискової борони [147]; впливу конструкції дискового сошника безорних сівалок на якість отриманого посівного ложа [155]; інженерного менеджменту ґрунтообробних агрегатів із пружними стояками сферичних дисків [157]; деяких аспектів, що стосуються фізичних параметрів і зношування дискових сошників посівних машин [158]; прогнозування тягової сили для високошвидкісних дискових знарядь шляхом використання дискретного елементного моделювання [159]; застосування дводискового сошника для сівалки безоранкового обробітку, яка одночасно вносить гранульовані добрива та насіння пшениці [165]; зниження механічного опору дискових сошників [166]; визначення геометричних параметрів дводискової сівалки для безпосереднього посіву у ґрунт після збирання пшениці [168]; конструювання та експериментальних оцінок пристрою для ущільнення борозни дводискового сошника [172]; ефективності дисків для консервуючого обробітку ґрунту в інтенсивній системі рисово-пшеничного сівозміну [173]; оптимізації конструкції дискових сошників безоранкової сівалки для вирощування сидератів [176]; порівняння продуктивності різання ґрунту й кукурудзяних залишків різними дисками [178]; факторів, що впливають на якість обробітку ґрунту дисковими боронами [180]. Новинки дискових борін від вітчизняних та іноземних виробників сільськогосподарської техніки подає видання [26].

Розглянута вище література свідчить, що сільськогосподарські дискові знаряддя для механічного обробітку ґрунту доволі популярні на сучасному етапі розвитку аграрних технологій. Не будемо більш зупинятись на вже проаналізованих їхніх перевагах щодо продуктивності, економічності та екологічності. Акцентуємо прогресивний технічний напрямок багатофункціональності при мінімальному, тобто безоранковому, обробітку землі.

Мається на увазі поєднання технологічних операцій формування борозни, внесення до неї добрив і насіння. Це здійснюється такими знаряддями, як сошники (див. рис. 1.3).

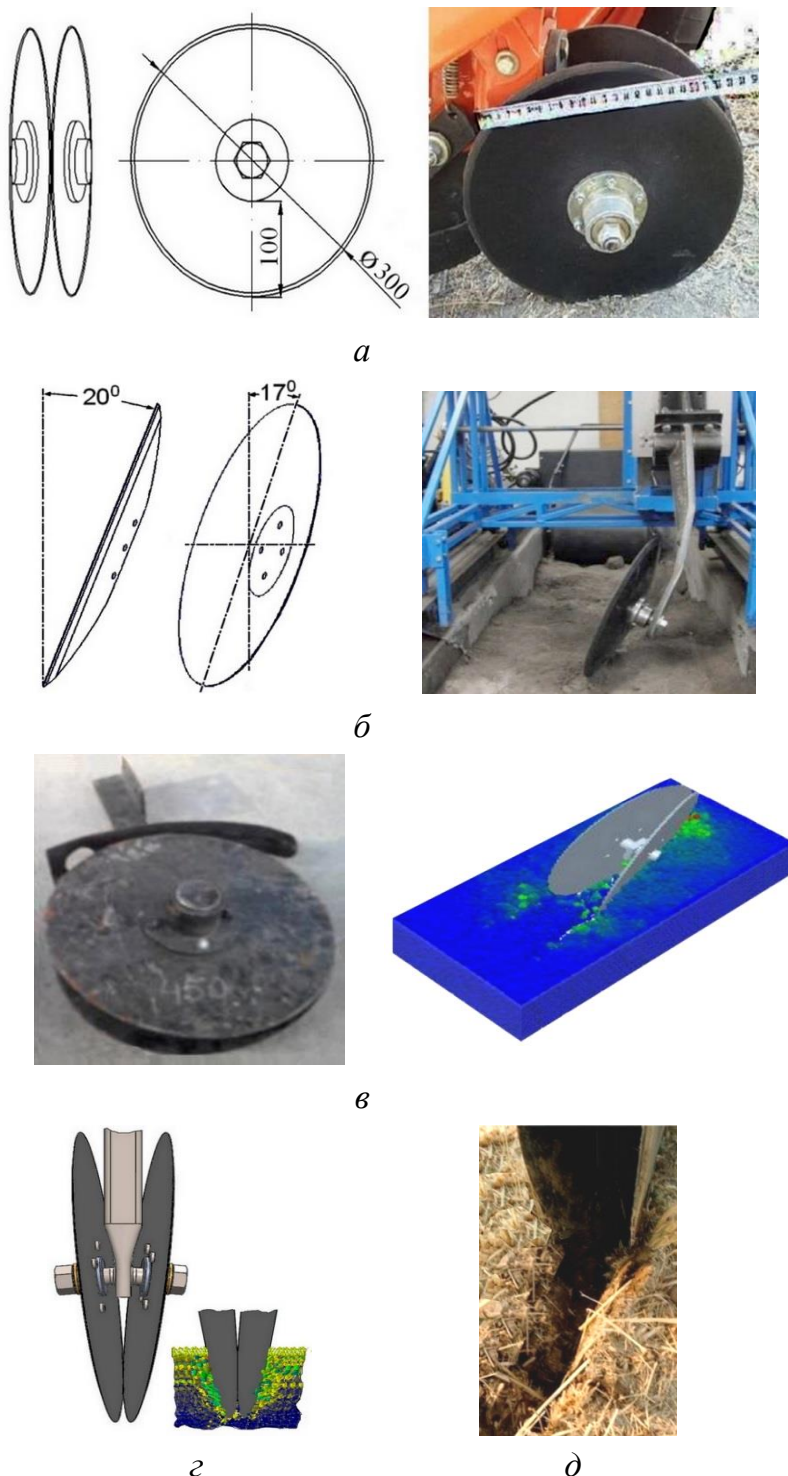


Рис. 1.3. Геометричні параметри, конструкція, моделювання та результати натурних експериментів дискових сошників:

а – стаття [139]; *б* – дослідження [159]; *в* – праця [123];

г – видання [165]; *д* – публікація [158]

За своєю конструкцією вони можуть бути одно- та дводисковими. Незважаючи на певне ускладнення, в останньому випадку досягається задовільна експлуатація на різноманітних ґрунтах. Приведені наукові праці показують, що важливими задачами в теоретичному і практичному плані постають питання щодо інтеграції конструкційних та експлуатаційних геометричних параметрів дискових знарядь для механічного обробітку ґрунту. Для перших це стосується, наприклад, діаметрів і кутів встановлення дисків, а для других – глибини обробітку, характеру отриманого профілю борозни, енергетичних витрат тощо. На підставі наведених фактів у якості предмета цих дисертаційних досліджень обрано *дводискові сошники та дискові підгортачі*. Такий підхід дозволяє охопити механічний обробіток ґрунту не тільки на стадії посіву, а й догляду за рослинами. Також приділено увагу автоматизації вказаних технологічних операцій за рахунок перспективної їхньої роботизації.

1.2. Геометричне моделювання як базова складова процесів проєктування, виготовлення та експлуатації технічних об'єктів машинобудування

У даному підрозділі зроблено акцент на аналізі літературних джерел, що стосуються застосування геометричного моделювання під час проєктування, виготовлення та експлуатації технічних об'єктів машинобудування. Це обумовлено обраною тематикою наукового дослідження, яке присвячено конструкційно-експлуатаційним геометричним параметрам і характеристикам дискових знарядь для механічного обробітку ґрунту.

Загальні відомості з теорії технічних систем та їхнього моделювання подаються у виданнях [3, 37, 59–61, 71, 72, 76, 78, 80, 82, 83, 85, 93, 106, 108, 113, 114, 117]. Під технічною системою розуміють створену людьми деяку сукупність елементів, об'єднаних належними зв'язками в певну цілісність, призначену для виконання потрібних завдань. Головними властивостями вказаних систем, крім необхідної функціональності, є їхня структура та засоби керування. Життєвий цикл включає такі стадії, як дефініція існуючих потреб,

наукові дослідження, проєктування, виготовлення, експлуатація, утилізація. Моделювання технічної системи – це формування інформаційної та / або матеріальної моделі, що відтворює досліджувані властивості й функціонування реальної системи. Основними етапами вказаного процесу є постановка задачі, побудова моделі та її тестування, безпосереднє моделювання, опрацювання отриманих результатів, покращення вихідної системи.

При проєктуванні, виготовленні та експлуатації технічних об'єктів машинобудування застосовуються дві діалектично пов'язані методології у вигляді *аналізу* й *синтезу*. Перша полягає в поділі вихідного цілого на частини, а друга – в новому поєднанні та декотрому змінюванні останніх з метою цілеспрямованих модифікацій вихідного об'єкта або процесу. Зазначені засоби становлять фундаментальні засади *системного підходу* до створення й використання різноманітної промислової продукції. При цьому найбільш поширені методи: *аналітичні* (описують властивості досліджуваного предмета або процесу за допомогою функціональних залежностей), *числові* (орієнтовані на розв'язування математичних задач комп'ютерами), *геометричні* (кресленики, схеми, графіки, діаграми, тривимірні моделі тощо), *імітаційні* (зазвичай відтворюють на комп'ютері поведінку опрацьовуваних об'єктів і процесів), *натурні* (застосування матеріальних моделей, подібних за певними властивостями до оригіналу). У кожних із перерахованих методів є свої переваги та недоліки. Наприклад, аналітичним притаманне теоретичне узагальнення, але нерідко вони мають обмежену сферу свого практичного використання. У числових методів це доволі часто відбувається навпаки. Натурні з вищою ймовірністю забезпечують істинність отримуваних результатів, але на відміну від інформаційних, як правило, потребують і більших витрат різноманітних ресурсів. На нинішньому етапі розвитку суспільства, завдяки стрімкому підвищенню можливостей обчислювальної техніки, все ширшим стає використання аналітичних, числових, імітаційних та геометричних методів у вигляді відповідних комп'ютерних моделей. Інтегруюча методологічна роль при цьому належить *геометричним засобам*, оскільки уявити без них повноцінне застосування решти методів досить важко.

Проектування об'єктів машинобудування до свого складу включає етап технічної пропозиції, ескізне, технічне та робоче проектування. Під час першого узгоджується технічне завдання, формується концепція створюваного об'єкта, визначаються його базові параметри й характеристики. Метою ескізного проектування є аналіз можливих варіантів виробу, обрання серед них найкращого, дефініція принципових інженерних рішень, які дають загальне уявлення про будову, виготовлення та функціонування опрацьовуваного об'єкта. Технічне проектування передбачає формування документації, яка містить остаточні прийняті рішення, що надають повне уявлення про конструкцію, виготовлення та подальшу експлуатацію створюваного об'єкта. Робоче проектування забезпечує отримання комплекту документів, які призначені для безпосереднього виготовлення й експлуатації промислової продукції.

На всіх проаналізованих вище стадіях та етапах життєвого циклу виробів машинобудування обов'язковим компонентом постає *геометричне моделювання* у вигляді певних креслеників, схем, графіків, діаграм, відповідних комп'ютерних моделей тощо. Крім того, йому належить об'єднуюча й узгоджувальна роль для багатьох проектних моделей промислової продукції, таких як міцності, інших розрахунків, технології виготовлення, експлуатаційних, економічних і т. д. Отже, *геометричним моделям*, тобто параметрам та характеристикам форми, розмірів і положення технічних об'єктів, треба приділяти достатньо уваги для забезпечення необхідної якості проаналізованої промислової продукції.

Праці [4, 81, 84] висвітлюють важливий сучасний інноваційний напрямок створення роботизованих систем. Він засвідчує нинішню провідну тенденцію розвитку машинобудування, яка полягає в неухильному переході від *механіки* до *мехатроніки*, що інтегрує механічні та електронні засоби. Технологічні основи машинобудування викладено в публікаціях [49, 121], моделювання управління відповідними процесами – у виданні [86]. Аналіз методів проектування нових технічних систем, їхнього конструювання здійснено у статтях [55, 56].

Суттєвими моментами для сучасного розробляння, виготовлення та експлуатації об'єктів машинобудування є ефективне управління відповідними проектами [6, 101], усім життєвим циклом [7, 63, 69, 143], питання оптимізації [9, 50, 77, 169, 170], використання CAD /CAE/CAM систем [92, 102, 111, 112, 128, 129, 136, 140, 141, 154, 160].

Відомо, що однією з основ інтеграції процесів конструювання (CAD), інженерних розрахунків (CAE) та виготовлення (CAM) під час опрацювання в комп'ютерних пакетах різних технічних об'єктів слугує геометричне моделювання. Нинішній його математичний апарат становлять NURBS [137, 174, 179], тобто неоднорідні раціональні базисні сплайни. Ці засоби успішно реалізують гнучке параметричне визначення багатоманітної промислової продукції як у вигляді належних ліній та поверхонь, так і віртуальних тривимірних твердотільних фігур.

На вказаних теоретичних засадах створюються потрібні деталі та складанні одиниці виробів машинобудування. Окреслений підхід слугує належною базою для проведення відповідної оптимізації технічних об'єктів, тобто дефініції раціональних їхніх параметрів і характеристик стосовно конструювання, виготовлення та експлуатації. Однак для промислової продукції досить часто важлива потреба визначення належного складу застосованих компонентів і взаємозв'язків між ними, іншими словами раціональної структури. Такі задачі також варто розв'язувати засобами комп'ютерного автоматизованого проєктування, зокрема з використанням методології структурно-параметричного формоутворення, запропонованої науковою школою «Геометричне моделювання об'єктів, процесів та явищ» Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (кафедра нарисної геометрії, інженерної та комп'ютерної графіки фізико-математичного факультету). Короткий огляд головних можливостей указанного підходу міститься в наступному підрозділі даного дисертаційного дослідження.

1.3. Структурно-параметричне формоутворення – прогресивний напрямок сучасного автоматизованого проєктування

Базові відомості стосовно методології структурно-параметричного геометричного моделювання технічних об'єктів наведено в докторській дисертації [18] та монографії [14]. Фундаментальними засадами зазначеного формоутворення є широке застосування принципів:

- *системного підходу* (досліджуваний об'єкт або процес розглядається одночасно як сукупність пов'язаних елементів та потенційний компонент для системи вищого рівня);
- *варіантності* (реалізація геометричною моделлю гнучкого, продуктивного та прогнозованого створення структурно-параметричних варіантів певного об'єкта або процесу);
- *універсальності* (розв'язування широкого кола задач);
- *оптимальності* (наявність засобів дефініції раціональних величин параметрів та характеристик досліджуваних об'єктів і процесів);
- *відкритості та розвитку* (можливість оновлення й розширення своїх складових);
- *комплексного підходу* (пристосованість геометричної моделі до вимог інших моделей опрацьовуваного об'єкта або процесу).

Виданням [118] наведені вище основи доповнено *принципом інтеграції*, що вимагає поєднання як стадій та етапів життєвого циклу технічної продукції, так і відповідних засобів геометричного моделювання у вигляді належного запропонованого математичного апарату.

Згідно з публікаціями [14, 18] реалізація структурно-параметричного формоутворення з використанням теорії множин і графів здійснюється наступним чином. Склад структурних елементів модельованого об'єкта O подається упорядкованою множиною

$$O = (o_i)_{i=1}^N, \quad (1.1)$$

де o_i – структурні елементи;

N – їхня кількість.

Варіанти для o_i описуються кортежем

$$o_i = (o_{ij})_{j=1}^{N_i} \quad (1.2)$$

і параметрами

$$P_{ij} = (p_{ijk})_{k=1}^{Np_{ij}}, \quad (1.3)$$

де Np_{ij} – число параметрів j -го варіанта i -го елемента.

Зауважимо, що динамічним, тобто змінюваним, об'єктом можна моделювати певні процеси. Тому методологія, яка розглядається, придатна також і для їхнього проектування.

Як видно, вирази (1.1) ... (1.3) відповідають варіантному аналізу можливих складових опрацьовуваного об'єкта. Нехай n -й та m -й його елемент мають проєктні різновиди

$$o_n = (o_{ni})_{i=1}^{N_n}, \quad o_m = (o_{mj})_{j=1}^{N_m}. \quad (1.4)$$

де N_n та N_m належне їхнє число.

Важливим наступним кроком є моделювання структури досліджуваного об'єкта, тобто взаємодії кортежів (1.4). Це здійснюється за допомогою матриць суміжності

$$C_{n,m} = [c_{nr,ms}] \quad (1.5)$$

де $n \neq m$;

$$r \in (1 \dots N_n);$$

$$s \in (1 \dots N_m);$$

$c_{nr,ms} \neq 0$ при взаємодії різновидів o_{nr} та o_{ms} , $c_{nr,ms} = 0$ – в іншому разі.

Після виконаної декомпозиції (1.1) ... (1.4) об'єкта O , визначення взаємозв'язків (1.5) і встановлення необхідних аналітичних параметричних залежностей подальший крок моделювання полягає в обчисленні та оптимізації потрібних інтегральних характеристик. Це реалізується шляхом комбінаторного синтезу варіантів у вигляді певного порядку об'єднання окремих складових. Таким прикладом є графова модель, зображена на рис. 1.4. Її вершинами слугують елементи (1.1), ребрами – параметричні моделі (1.2), які забезпечують величини (1.3).

Визначення оптимального проектованого структурно-параметричного варіанта, що являє собою елементарний ланцюг із початком у вершині O_1 та кінцем в O_N , зводиться до дефініції відповідного екстремального шляху в поданому графі.

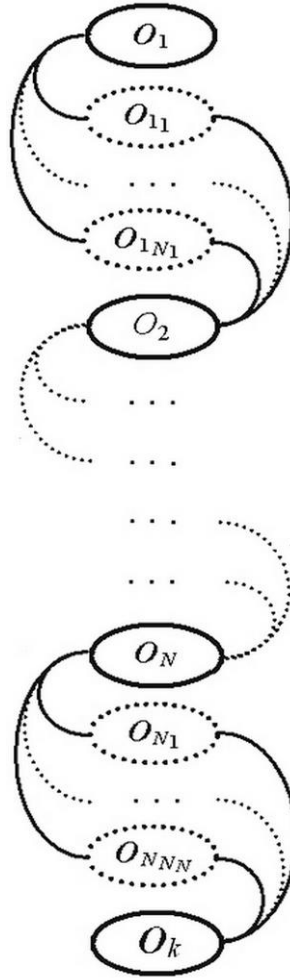


Рис. 1.4. Варіант синтезу структурно-параметричного об'єкта O
згідно з працею [18]

Як результат моделювання за описаною схемою маємо кортеж варіантів проектованого об'єкта

$$O = (O_k)_{k=1}^{N_o}. \quad (1.6)$$

Акцентуємо, що зі зміною наявних умов оптимізації попередньо обчислений раціональний різновид може змінитися на інший елемент множини (1.6). При цьому він визначиться автоматично завдяки запропонованому математичному апарату.

Отже, викладені відомості цього підрозділу даного дисертаційного дослідження свідчать про прогресивний характер сучасного комп'ютерного проєктування у вигляді методології структурно-параметричного формоутворення.

1.4. Мета та завдання дисертаційного дослідження

На поточний момент нами в достатньому обсязі виконано за наявними літературними джерелами багатогранний аналіз сучасного стану проєктування сільськогосподарських ґрунтообробних знарядь взагалі та дискових, як найбільш прогресивних на нинішньому етапі розвитку аграрних технологій, зокрема. Було показано, що геометричне моделювання являє собою базову складову процесів проєктування, виготовлення та експлуатації різноманітної продукції машинобудування. Обґрунтовано перспективність для створення технічних об'єктів методології комп'ютерного структурно-параметричного формоутворення.

Існуючі факти також свідчать про тісний взаємний зв'язок між конструкційними та експлуатаційними геометричними параметрами й характеристиками дискових сільськогосподарських знарядь для механічного обробітку ґрунту. Це стосується діаметрів і кутів встановлення дисків, глибин обробітку та отримуваних при цьому профілів борозни. Останні властивості суттєвим чином впливають не тільки на енергетичні витрати, а й показники ефективності аграрного виробництва. Спираючись на запропонований у докторській дисертації [118] принцип інтеграції, було вирішено його застосувати для опрацювання конструкційно-експлуатаційних геометричних параметрів і характеристик дискових ґрунтообробних знарядь.

Це дозволило сформулювати мету даного дисертаційного дослідження, яка полягає в напрацюванні математичного апарату для інтегрованого варіантного моделювання конструкційно-експлуатаційних геометричних параметрів і характеристик дискових знарядь для механічного обробітку ґрунту на прикладі дводискових сошників і дискових підгортачів.

Для досягнення поставленої мети було виконано та визначено такі завдання.

1. Проаналізувати сучасний стан проектування сільськогосподарських ґрунтообробних знарядь, окреслити перспективи їхнього подальшого вдосконалення.

2. Обґрунтувати доцільність використання інтегрованого підходу до моделювання конструкційно-експлуатаційних геометричних параметрів та характеристик дискових знарядь для механічного обробітку ґрунту на засадах методології структурно-параметричного формоутворення.

3. Розробити математичний апарат інтегрованого моделювання конструкційно-експлуатаційних геометричних параметрів і характеристик дискових сошників та підгортачів.

4. Розробити спосіб керування отримуваним профілем борозни за допомогою кутів позиціонування дисків на основі встановлених відповідних аналітичних залежностей.

5. Напрацювати концептуальну конструкцію універсальних дводискових сошників, пристосованих для здійснення як звичайної, так і вузькорядної сівби.

6. Розробити конструкцію дводискового сошника з гнучкою багатоланковою стовбою у вигляді роботизованої системи з дистанційно-керованими елементами.

7. Розробити метод граничних оцінок впливу профілю борозни на експлуатаційні енергетичні характеристики ґрунтообробних знарядь, який проілюструвати на прикладі дводискових сошників.

8. Удосконалити теорію автоматизованого варіантного проектування виробів машинобудування запропонованими інтегрованими конструкційно-експлуатаційними геометричними моделями дискових знарядь для механічного обробітку ґрунту.

9. Упровадити отримані наукові результати виконаного дисертаційного дослідження у практику.

10. Визначити напрямки подальшого розвитку запропонованого підходу до моделювання конструкційно-експлуатаційних геометричних параметрів і характеристик дискових знарядь для механічного обробітку ґрунту.

Сформульовані вище завдання обумовили зміст даного дисертаційного дослідження, яке спрямоване на розв'язання актуальних теоретичних і практичних задач.

Висновки до розділу 1

У цій частині дисертації виконано аналіз сучасного стану проєктування сільськогосподарських ґрунтообробних знарядь. Опрацьовано загальні питання створення аграрної техніки, подальшого підвищення її продуктивності, економічності, надійності, екологічності, зменшення різноманітних витрат під час експлуатації, інтенсифікації інноваційних підходів, зокрема, впровадження комп'ютерних інформаційних технологій, роботизації і т. д. Особливу увагу приділено дисковим ґрунтообробним знаряддям, як доволі перспективним на теперішньому етапі розвитку сільськогосподарського виробництва. Зазначено, що покращенню якості проєктування, виготовлення та функціонування аграрної техніки суттєво сприяють CAD/CAE/CAM системи, важливим базовим компонентом яких є геометричні засоби. Останні забезпечують гнучке і продуктивне автоматизоване конструювання промислової продукції, синтез варіантів їх оптимізацію.

Розглянуті вище питання першого розділу дисертації знайшли своє відображення у працях [10, 15, 17, 19–21, 34, 119, 120], виконаних за участю автора даного наукового дослідження.

На підставі систематизації наведених відомостей, здійснення їхнього всебічного аналізу та шляхом певних узагальнень зроблено наступні висновки до першого розділу дисертації.

1. Серед різноманітних сільськогосподарських знарядь для механічного обробітку ґрунту дискові є найперспективнішими з точки зору економічності та дотримання екологічних вимог. Зазначений факт обумовив обрання для досліджень саме цієї групи знарядь.

2. Літературні джерела показали, що зараз доволі популярний мінімальний, тобто без оранки, обробіток землі під час якого поєднуються такі технологічні аграрні операції, як формування потрібної борозни та внесення до неї добрив і насіння. Це здійснюється сошниками, серед яких більш досконалі дводискові. Тому головну увагу далі спрямовано на них та дискових підгортачах. Останнє дозволяє охопити механічний обробіток ґрунту не тільки на стадії посіву, а й догляду за рослинами.

3. Проаналізовані дослідження засвідчили тісний зв'язок між конструкційними та експлуатаційними геометричними параметрами й характеристиками дискових знарядь для механічного обробітку ґрунту. Це стосується діаметрів і кутів встановлення дисків, глибини обробітку, характеру отриманого профілю борозни, енергетичних витрат тощо. Наведені факти обумовили актуальність докладного вивчення вказаних питань.

4. Наявні видання підтверджують провідну роль моделювання взагалі та геометричного зокрема, як базового компонента процесів проектування, виготовлення й експлуатації продукції машинобудування. Зроблені висновки визначили предмет даного наукового дослідження у вигляді інтегрованих конструкційно-експлуатаційних геометричних моделей дискових сошників і підгортачів.

5. Запропоновано застосування структурно-параметричного формоутворення в якості методологічної основи для досягнення мети дисертаційного дослідження, яка полягає в напрацюванні належного математичного апарату для інтегрованого варіантного моделювання конструкційно-експлуатаційних геометричних параметрів і характеристик дискових знарядь для механічного обробітку ґрунту на прикладі сошників та підгортачів.

6. Визначено конкретні завдання, які забезпечують виконання поставлених задач дисертації.

РОЗДІЛ 2

ТЕОРЕТИЧНІ ЗАСАДИ ГЕОМЕТРИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ДИСКОВИХ ЗНАРЯДЬ ДЛЯ МЕХАНІЧНОГО ОБРОБІТКУ ҐРУНТУ

У цій частині дисертації представлено теоретичні основи запропонованого інтегрованого математичного та комп'ютерного моделювання геометричних конструкційно-експлуатаційних параметрів дискових знарядь для механічного обробітку ґрунту на прикладі сошників і підгортачів. Подано належну концепцію, відповідний математичний апарат, узагальнену модель формоутворення поверхонь дисків та напрацьований метод граничних оцінок впливу профілю борозни на експлуатаційні енергетичні характеристики ґрунтообробних знарядь. Зазначені відомості слугують базою для проєктування в наступних розділах дисертації конкретних сошників і підгортачів.

2.1. Запропонована концепція

Дводискові сошники

Спираючись на викладену в підрозділі 1.3 методологію структурно-параметричного формоутворення, під час проєктування опрацьовуваних дискових ґрунтообробних знарядь спочатку визначається склад їхніх компонентів. Для запропонованої конструкції дводискових сошників (*СОШ*), показаної на рис. 2.1, маємо:

$$СОШ = (БЛК, КРК, СТК, КРР, ДСК, ЕКР), \quad (2.1)$$

де *БЛК* – балка рами;

КРК – кронштейн кріпильний;

СТК – стояк;

КРР – кронштейн регулювальний;

ДСК – диск із маточиною та вальницею;

ЕКР – елементи кріпильні.

Зауважимо, що проєктована структура цих ґрунтообробних знарядь може мати два принципові різновиди (див. рис. 2.1 *а* та рис. 2.1 *б*).

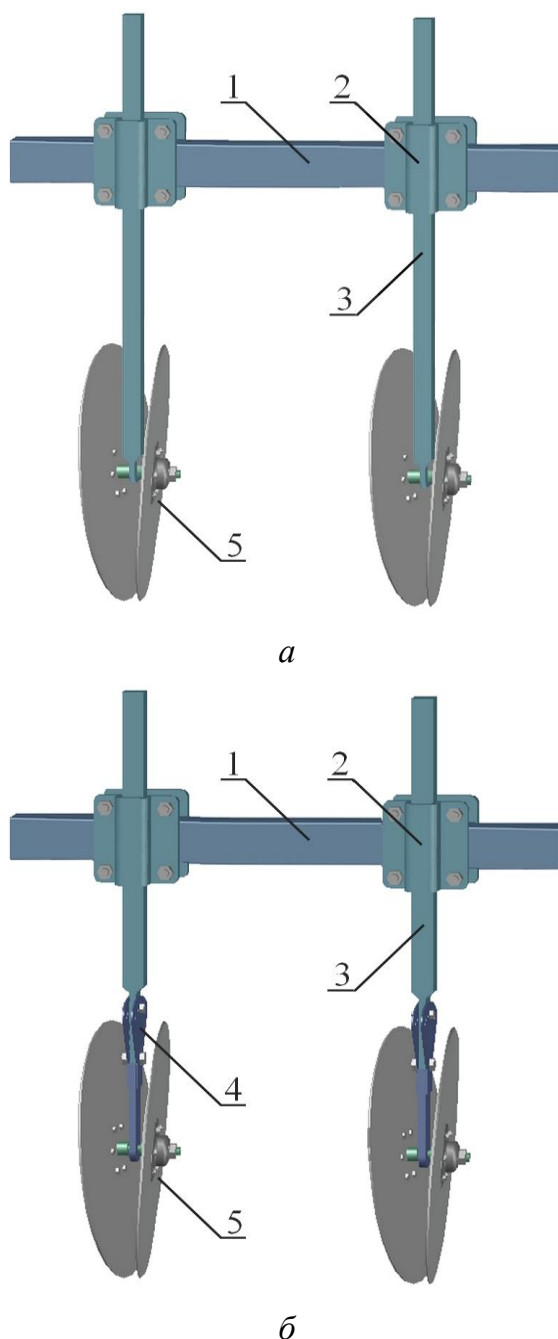


Рис. 2.1. Основні складові конструкції дводискового сошника:

1 – балка рами; 2 – кронштейн кріпильний; 3 – стояк; 4 – кронштейн регулювальний; 5 – диск із маточиною та вальницею

Перший варіант без регулювального кронштейна. Осі обертання дисків розташовані на стояках і забезпечують сталі кути встановлення робочих органів. Перевага такої структури полягає у простоті конструкції та її експлуатації. Головним недоліком є неможливість забезпечення належного рівня енергетичних витрат і високих аграрних показників для різноманітних умов використання. При наявності регулювального кронштейна у другому

випадку наведені переваги й недоліки міняються своїми місцями. Іншими словами, дещо ускладнюється конструкція, її практичне застосування, але підвищується енергоефективність та якість сільськогосподарських процесів для ширшого кола наявних обставин функціонування вказаних ґрунтообробних знарядь. Таким чином, кожна розглянута структура дводискових сошників має право на існування, тому повинна бути відтворена належною математичною моделлю.

Мета ескізного проєктування полягає у проведенні аналізу можливих варіантів виробу, обранні серед них найкращого, дефініції принципів інженерних рішень, які дають загальне уявлення про будову, виготовлення та функціонування опрацьовуваного об'єкта. Нехай маємо наступні множини різновидів основних складових:

$$CTK = (CTK_j)_{j=1}^{N_{CTK}}, \quad (2.2)$$

$$KPP = (KPP_j)_{j=1}^{N_{KPP}}, \quad (2.3)$$

$$ДСК = (ДСК_j)_{j=1}^{N_{ДСК}}. \quad (2.4)$$

Під час ескізного проєктування, див. кортежі (2.1) ... (2.4), деякі компоненти можуть не розглядатися. У даному випадку це балки *БЛК*, кронштейни кріпильні *КРК* та елементи кріплення *ЕКР*. Останнє обумовлено тим, що на досліджувані конструкційно-експлуатаційні геометричні параметри та характеристики у вигляді діаметрів дисків, кутів їхнього встановлення й отримувані профілі борозни зазначені компоненти безпосередньо не впливають. Балки з труб прямокутного перерізу є елементами рам, до яких приєднуються сошники. Регулювання робочої висоти останніх і потрібної відстані між ними здійснюється кронштейнами кріплення. Так встановлюється необхідна ширина міжрядь механічного обробітку ґрунту. Визначення конкретних параметрів кріпильних елементів здійснюється на подальших етапах проєктування.

Кожен з варіантів (2.2) ... (2.4) здатний мати певні різноманітні технічні, економічні та інші параметри

$$P_{CTK_j} = (p_{CTK_{jk}})_{k=1}^{Np_{CTK_j}}, \quad (2.5)$$

$$P_{KPP_j} = (p_{KPP_{jk}})_{k=1}^{Np_{KPP_j}}, \quad (2.6)$$

$$P_{ДСК_j} = (p_{ДСК_{jk}})_{k=1}^{Np_{ДСК_j}}. \quad (2.7)$$

Для стояків це можуть бути поперечний переріз (прямокутний, квадратний, двотавровий тощо), довжина, геометрія осей обертання, марка конструкційного матеріалу, вага, вартість і т. д.; для регулювальних кронштейнів, їхніх осей та дисків – параметри форми й розмірів, матеріал, вага, вартість тощо.

Серед величин (2.5) ... (2.7) в аспекті даного наукового дослідження, присвяченого опрацюванню конструкційно-експлуатаційних параметрів і характеристик дискових знарядь для механічного обробітку ґрунту, важливими є діаметри D дисків та кути їхнього встановлення. При цьому кут α є відхиленням дисків у горизонтальній площині від напрямку руху знаряддя, тобто при його нульовій величині горизонтальний діаметр диска колінеарний швидкості поступального переміщення. Кут β встановлює вертикальне відхилення дисків, при його нульовому значенні площина їхніх діаметрів нормальна до горизонтальної площини. Кут γ – це поворот дисків навколо осі, перпендикулярної площині симетрії знаряддя. Проаналізовані конструкційні параметри, разом із базовою аграрно-технічною величиною у вигляді необхідної глибини механічного обробітку ґрунту, формують таку найбільш суттєву відповідну характеристику, як отримуваний профіль борозни.

Розглядатимемо наступні послідовності створення сошників:

$$(CTK, KPP, ДСК), \quad (2.8)$$

$$(CTK, ДСК). \quad (2.9)$$

Кортеж (2.8) подає знаряддя з регулювальним кронштейном, а (2.9) – без нього. Рис. 2.2 ілюструє належні матриці суміжності, в яких можливими значеннями є 1 при взаємодії відповідних елементів або 0 при її відсутності.

$\begin{matrix} KPP \\ CTK \end{matrix}$	KPP_1	$\dots$	$KPP_{N_{KPP}}$
CTK_1	1(0)	1(0)	1(0)
$\dots$	1(0)	1(0)	1(0)
$CTK_{N_{CTK}}$	1(0)	1(0)	1(0)

a

$\begin{matrix} ДСК \\ KPP \end{matrix}$	$ДСК_1$	$\dots$	$ДСК_{N_{ДСК}}$
KPP_1	1(0)	1(0)	1(0)
$\dots$	1(0)	1(0)	1(0)
$KPP_{N_{KPP}}$	1(0)	1(0)	1(0)

б

$\begin{matrix} ДСК \\ CTK \end{matrix}$	$ДСК_1$	$\dots$	$ДСК_{N_{ДСК}}$
CTK_1	1(0)	1(0)	1(0)
$\dots$	1(0)	1(0)	1(0)
$CTK_{N_{CTK}}$	1(0)	1(0)	1(0)

в

Рис. 2.2. Матриці суміжності:

a – $M_{CTK-KPP}$; *б* – $M_{KPP-ДСК}$; *в* – $M_{CTK-ДСК}$

Проаналізований випадок відтворює структурно-параметрична графова модель (СПГМ), зображена на рис. 2.3. Як результат одержуємо множину варіантів проєктованого об'єкта

$$COШ = (COШ_k)_{k=1}^{N_{COШ}}. \quad (2.10)$$

Наведеними у працях [14, 18] та іншими алгоритмами оптимізації на графах, з використанням у якості довжин ребер певних величин параметричних моделей, обчислюються необхідні раціональні техніко-економічні характеристики, виконується дефініція відповідних варіантів ґрунтообробних знарядь із множини (2.10).

На конструкції стояків зупинятися не будемо, оскільки вони не впливають безпосередньо на профіль борозни, як головну експлуатаційну характеристику сільськогосподарського механічного обробітку ґрунту. Зазначимо, що при потребі завдяки додатковим нарізевим засобам осі обертання дисків здатні змінювати свою довжину. Цим забезпечується застосування в сошнику дисків різних діаметрів, тобто розширюється сфера його практичного використання.

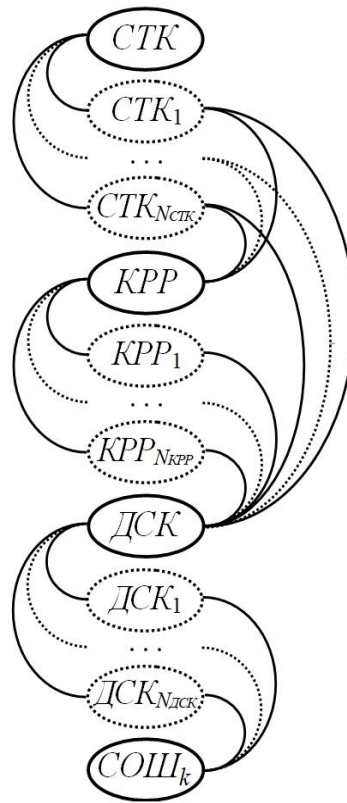


Рис. 2.3. СПГМ варіантного конструювання сошника

У плані прогнозованого керування отримуваним профілем борозни особливо важливі запропоновані в дисертації регульовальні кронштейни. Дефініція їхніх основних елементів здійснюється на засадах визначених аналітичних залежностей, які викладаються в наступному розділі. Розглянуті вище сошники, зазвичай, мають плоскі диски. Проте, заслуговує на увагу також проведення досліджень інших форм, наприклад, конічних, сферичних, еліпсоїдних тощо невеликої опуклості або угнутості. Далі подається матеріал стосовно загальної напрацьованої концепції математичного та комп'ютерного моделювання дискових підгортачів, у яких, як правило, сферичні робочі органи. Але й для них цікаві питання застосування відповідних еліпсоїдних, параболоїдних, гіперболоїдних та інших поверхонь. Тому наступний підрозділ дисертації присвячено запропонованій узагальненій математичній моделі формоутворення вказаних фігур в якості робочих органів сільськогосподарських дискових ґрунтообробних знарядь, що аналізуються. Окреслений підхід дозволяє використовувати як універсальну складову наведених СПГМ сошників і підгортачів зазначений параметричний компонент.

Дискові підгортачі

Приклад концептуальної конструкції досліджуваного знаряддя показано на рис. 2.4. Створення необхідної відповідної СПГМ виконуємо аналогічно порядку, представленому вище для сошників. Згідно з поданим рисунком склад проєктованих підгортачів (ПГТ) визначається множиною

$$ПГТ = (БЛК, КРК, СТК, ДСК, ЕКР), \quad (2.11)$$

де *БЛК* – балка рами;

КРК – кронштейн кріпильний;

СТК – стояк з віссю;

ДСК – диск із маточиною та вальницею;

ЕКР – елементи кріпильні.

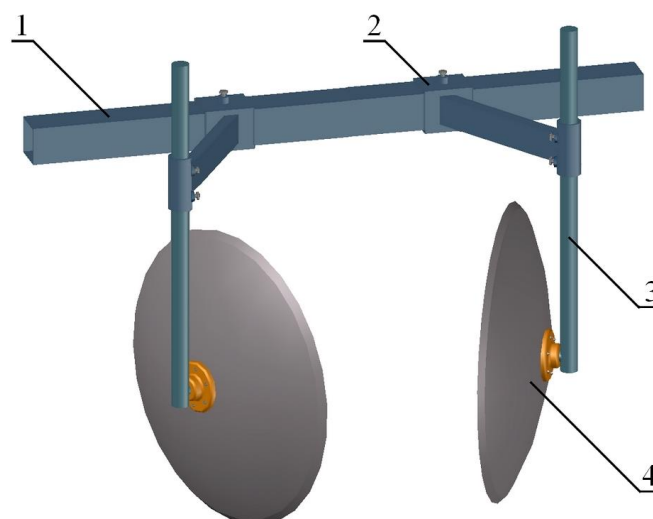


Рис. 2.4. Базові компоненти конструкції дискового підгортача:

1 – балка рами; 2 – кронштейн кріпильний; 3 – стояк з віссю;

4 – диск із маточиною та вальницею

Як видно, цей засіб слугує для нагортання ґрунту на певний рядок рослин. Балки з труб прямокутного перерізу є елементами рам, до яких прилаштовуються підгортачі. Регулювання потрібної їхньої робочої висоти та відстані між ними здійснюється кріпильними кронштейнами. За допомогою них також фіксується необхідний кут α встановлення дисків у горизонтальній площині відносно напрямку руху знаряддя. Їхнє відхилення від вертикалі, як

правило, дорівнює нулю. З метою розширення сфери свого ефективного практичного застосування підгортачі можуть мати змінні диски. Конкретизація інших елементів кріплення виконується на наступних етапах проєктування даних сільськогосподарських знарядь.

Як і в попередньому випадку, з множини (2.11) аналізуватимемо далі тільки конструкційні компоненти, що безпосередньо впливають на формування такої важливої агротехнічної характеристики механічного обробітку ґрунту, як отримуваний профіль борозни. Це стояки та диски. Нехай для них маємо кортежі проєктних різновидів

$$CTK = (CTK_j)_{j=1}^{N_{CTK}}, \quad (2.12)$$

$$ДСК = (ДСК_j)_{j=1}^{N_{ДСК}}. \quad (2.13)$$

Кожен з варіантів (2.12) і (2.13) описується певними різноманітними технічними, економічними та іншими параметрами

$$P_{CTK_j} = (p_{CTK_{jk}})_{k=1}^{Np_{CTK_j}}, \quad (2.14)$$

$$P_{ДСК_j} = (p_{ДСК_{jk}})_{k=1}^{Np_{ДСК_j}}. \quad (2.15)$$

Величини (2.14) і (2.15) багато в чому схожі з розглянутими вище для дискових сошників. Однак, є й певні відмінності. Наприклад, якщо в попередньому випадку поперечний переріз стояків міг бути прямокутною, квадратною, двотавровою або іншої форми, то зараз тільки круглою. Останнє обумовлено потребою гнучкого точного регулювання необхідного кута α встановлення дисків відносно напрямку руху знаряддя. Для продуктивного використання на практиці описаних вище прийомів визначення бажаного профілю борозни необхідна дефініція аналітичних співвідношень між наведеними параметрами. Ці важливі для конструювання та експлуатації дискових підгортачів питання вирішуються далі в четвертому розділі дисертації.

Нехай послідовність створення підгортачів

$$(СТК, ДСК). \quad (2.16)$$

На рис. 2.5 зображено матрицю суміжності для виразу (2.16), в якій можливими значеннями є 1 або 0.

$\begin{array}{c} ДСК \\ \diagdown \\ СТК \end{array}$	$ДСК_1$	$\dots$	$ДСК_{N_{ДСК}}$
$СТК_1$	1(0)	1(0)	1(0)
$\dots$	1(0)	1(0)	1(0)
$СТК_{N_{СТК}}$	1(0)	1(0)	1(0)

Рис. 2.5. Матриця суміжності $M_{СТК-ДСК}$

Розглянутий випадок відтворює СПГМ рис. 2.6.

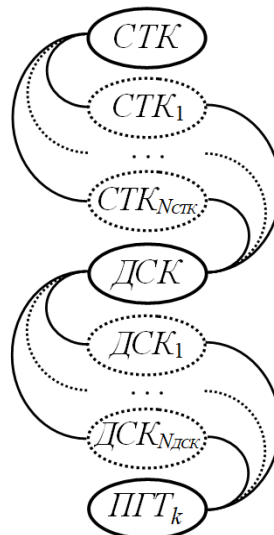


Рис. 2.6. Структурно-параметрична модель конструювання підгортача

Як результат отримуємо множину варіантів проєктованого об'єкта

$$ПГТ = (ПГТ_k)_{k=1}^{N_{ПГТ}}. \quad (2.17)$$

Визначення серед різновидів (2.17) оптимального здійснюється аналогічно порядку, представлениму вище для сошників. Після викладення концепції структурно-параметричного математичного та комп'ютерного моделювання вказаних знарядь перейдемо до опису запропонованої узагальненої моделі формоутворення поверхонь їхніх дисків.

2.2. Узагальнена модель формоутворення робочих поверхонь дисків

Матеріали попереднього підрозділу підтверджують важливість ефективного автоматизованого проєктування різноманітних дискових робочих поверхонь. Це стосується плоских, сферичних, еліпсоїдних, торових та інших поверхонь. У публікації [23], виконаній за участю автора даної дисертації, наведено загальну СПГМ поверхонь другого порядку, реалізовану засобами NURBS. Запропонований далі підхід стратегічно дещо схожий на поданий у виданні [175], але стосується не полицевих, а дискових ґрунтообробних знарядь. Для формоутворення дисків використовуватимемо геометричну параметричну модель, яку ілюструє рис. 2.7.

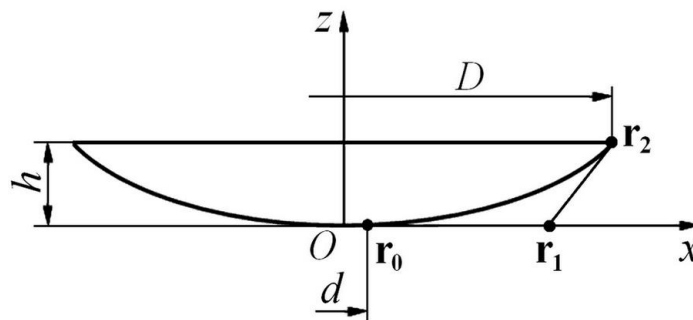


Рис. 2.7. Схема побудови робочої поверхні диска

Потрібну фігуру отримуємо обертанням у прямокутній системі координат $Oxyz$ навколо осі z твірної кривої другого порядку у векторній раціональній параметричній формі

$$\mathbf{r}(u) = \frac{(1-u)^2 \mathbf{r}_0 + w_1 2u(1-u) \mathbf{r}_1 + u^2 \mathbf{r}_2}{(1-u)^2 + w_1 2u(1-u) + u^2}, \quad (2.18)$$

де $\mathbf{r}(u)$ — радіус-вектор кривої;

$\mathbf{r}_0, \mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2$ — радіус-вектори вершин характеристичного трикутника у площині Oxz ;

$w_1 \geq 0$ — ваговий коефіцієнт;

$u \in [0, 1]$ — параметр.

Початком лінії (2.18) є $\mathbf{r}_0$, а кінцем — $\mathbf{r}_2$. У праці [14] вказано, що $w_1=0$ відповідає відрізок прямої; $0 < w_1 < 1$, $w_1=1$, $w_1 > 1$ — дуга еліпса, параболи та гіперболи; $w_1 = \cos(\theta/2)$ — дуга кола кутової величини θ , де $0 < \theta < \pi$.

Вершини $\mathbf{r}_0$ і $\mathbf{r}_1$ розміщуються на осі Ox , забезпечують потрібну горизонтальну дотичну на початку твірної. Додатна величина d обумовлює необхідний отвір у нижній частині диска. Координати $\mathbf{r}_2$ слугують для дефініції угнутості h (опуклості донизу) диска та його діаметра D . Положення $\mathbf{r}_1$ та $\mathbf{r}_2$ визначають напрям дотичної в точці $\mathbf{r}_2$.

Приклад змінювання розглянутої схеми параметричними засобами наведено на рис. 2.8.

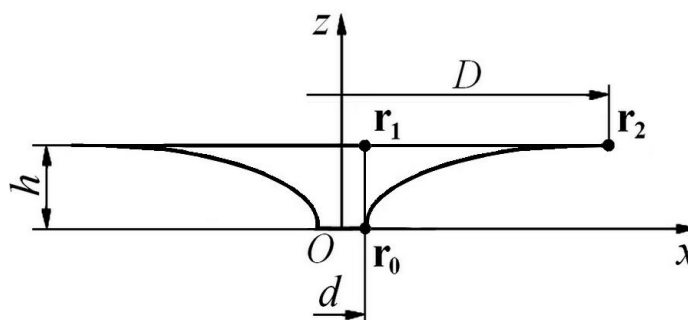


Рис. 2.8. Модифікована схема побудови дискової поверхні

Положенням вершини $\mathbf{r}_1$ реалізовано бажану опуклість вгору твірної кривої (2.18). На даному рисунку забезпечено вертикальність дотичної в її початку та горизонтальність у кінці. Однак, у загальному випадку акцентовані умови необов'язкові. Таким чином, проаналізованими фактами показано достатню гнучкість запропонованих засобів математичного та комп'ютерного геометричного моделювання.

У прямокутній системі координат $Oxuz$ з використанням осі обертання z і твірної кривої (2.18), розташованої у площині Oxz , рівняння дискової робочої поверхні

$$x = x(u) \cos(v); \quad y = x(u) \sin(v); \quad z = z(u), \quad (2.19)$$

де $v \in [0, 2\pi]$ – параметр кута повороту.

Змінюванням у виразах (2.18) і (2.19) координат вершин $\mathbf{r}_0$, $\mathbf{r}_1$, $\mathbf{r}_2$ та величини w_1 можна отримувати бажані параметри дисків D , d , h , а також необхідну їхню форму: *плоску, конічну, сферичну, еліпсоїдну, параболоїдну, гіперболоїдну* та ін. У зазначених випадках це реалізується належними значеннями w_1 . Для одержання площини треба розміщувати вершини $\mathbf{r}_0$ і $\mathbf{r}_2$ на однаковій висоті.

Побудову сегмента сфери радіуса R ілюструє рис. 2.9.

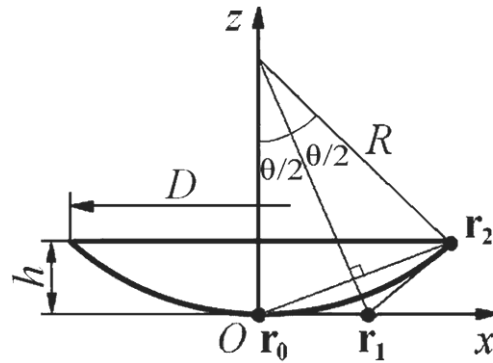


Рис. 2.9. Схема для сферичного диска

Для величин R та D угнутість h розраховується за формулою

$$h = R - \sqrt{R^2 - D^2 / 4}. \quad (2.20)$$

Характеристичні вершини кривої (2.18)

$$\mathbf{r}_0 = (0, 0, 0), \quad \mathbf{r}_1 = (R \cdot \tan \frac{\theta}{2}, 0, 0), \quad \mathbf{r}_2 = (\frac{D}{2}, 0, h), \quad (2.21)$$

а її ваговий коефіцієнт

$$w_1 = \cos(\theta / 2). \quad (2.22)$$

Кутова величина дуги

$$\theta = 2 \arcsin(\sqrt{D^2 / 4 + h^2} / 2R). \quad (2.23)$$

Вирази (2.18) ... (2.23) належним чином описують геометрію сферичної дискової робочої поверхні. Щоб отримати отвір діаметром d , за аналогією із зображенням на рис. 2.7 і рис. 2.8, твірна лінія рис. 2.9 вздовж осі x зсувається на дистанцію $d/2$. Тобто дані значення додаються до абсцис (2.21). Потрібно враховувати збільшення на подвійну вказану величину діаметра D . У розглянутому випадку одержуємо поверхню тора. Коли твірна є еліптичною, параболічною чи гіперболічною дугою, то матимемо належну тороподібну еліптичну, параболічну або гіперболічну поверхню.

На рис. 2.10 ... 2.14 показано поверхні та комп'ютерні геометричні твердотільні моделі проаналізованих дискових робочих органів, де через δ позначено їхню товщину.

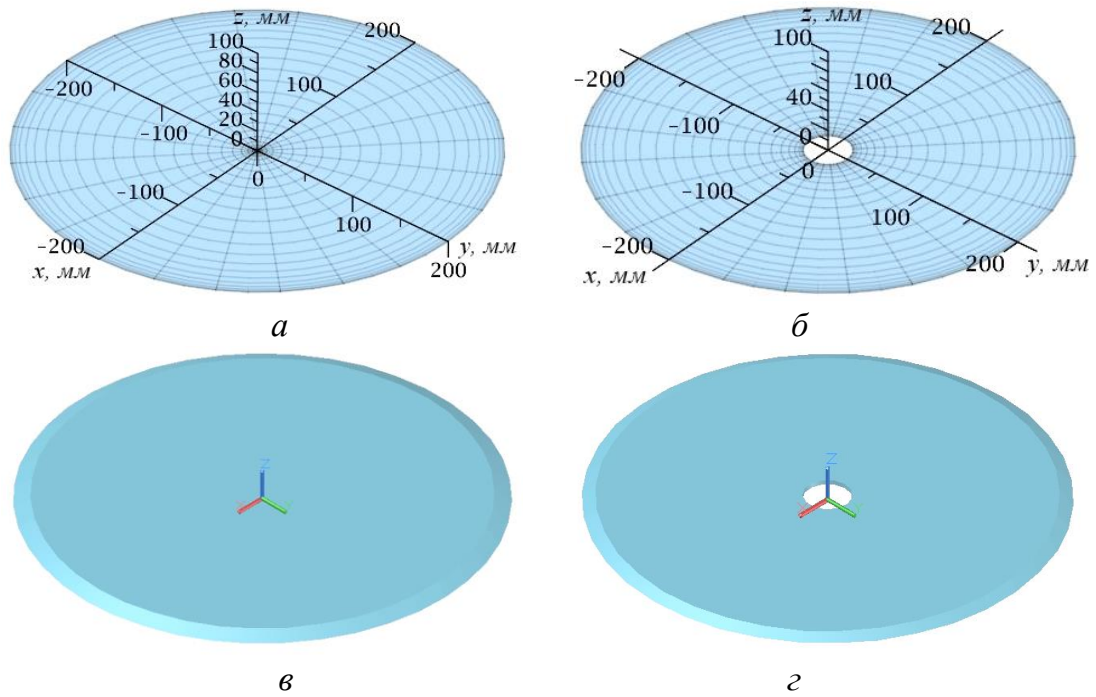


Рис. 2.10. Плоскі диски:

$a - D=400 \text{ мм}, d=0 \text{ мм}; \text{ б} - D=400 \text{ мм}, d=40 \text{ мм};$

$в - D=400 \text{ мм}, d=0 \text{ мм}, \delta=5 \text{ мм}; \text{ г} - D=400 \text{ мм}, d=40 \text{ мм}, \delta=4 \text{ мм}$

Рис. 2.10 і рис. 2.11 ілюструють відповідно плоскі та конічні диски,

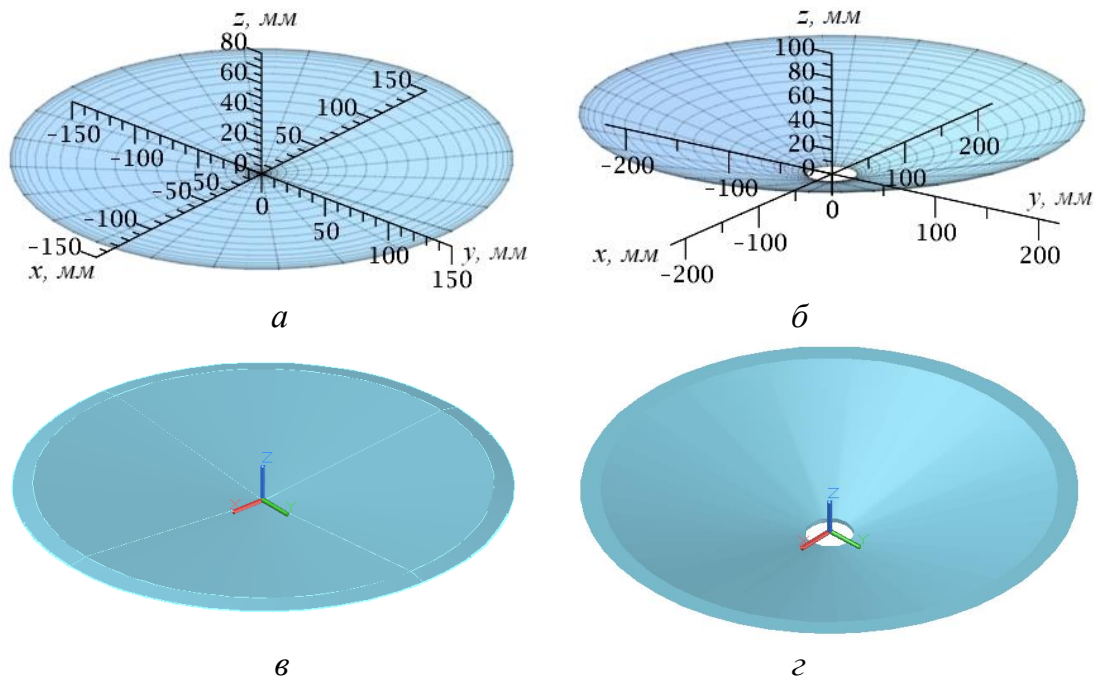


Рис. 2.11. Конічні диски:

$a - D=300 \text{ мм}, d=0 \text{ мм}, h=10 \text{ мм}; \text{ б} - D=400 \text{ мм}, d=40 \text{ мм}, h=50 \text{ мм};$

$в - D=380 \text{ мм}, d=0 \text{ мм}, h=15 \text{ мм}; \delta=4 \text{ мм}; \text{ г} - D=350 \text{ мм}, d=35 \text{ мм}, h=50 \text{ мм}, \delta=4 \text{ мм}$

На рис. 2.12 наведено зображення дисків сферичних і торових.

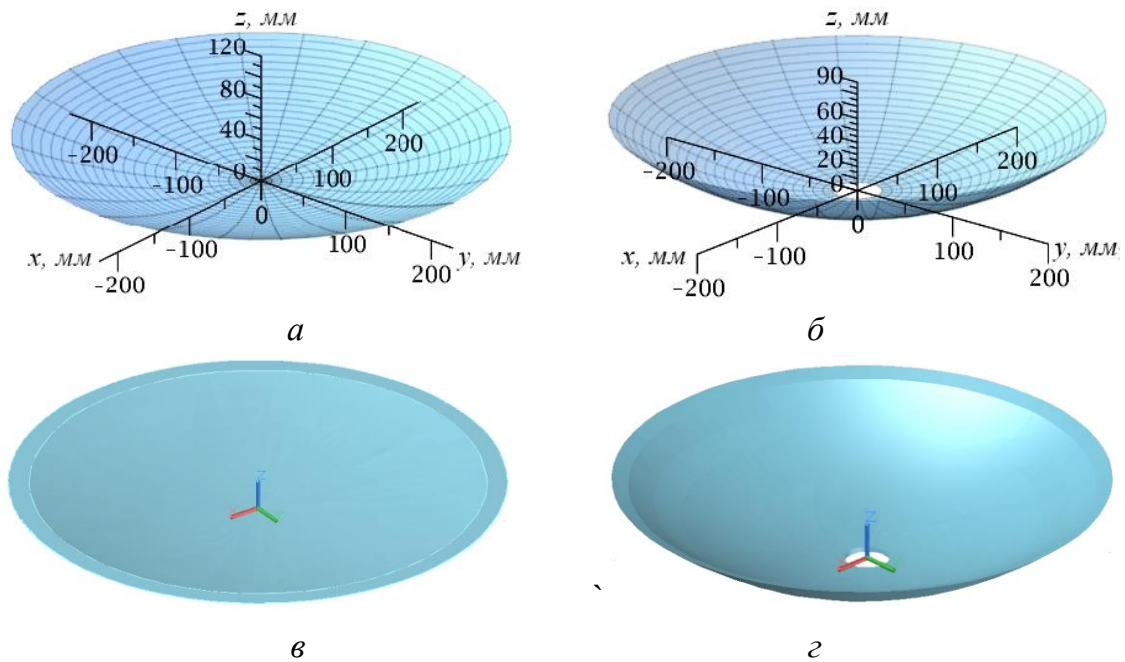


Рис. 2.12. Сферичні та торові ґрунтообробні знаряддя:

$a - D=450 \text{ мм}, R=600 \text{ мм}, d=0 \text{ мм};$ $б - D=400 \text{ мм}, R=300 \text{ мм}, d=40 \text{ мм};$
 $в - D=350 \text{ мм}, R=600 \text{ мм}, d=0 \text{ мм}, \delta=5 \text{ мм};$ $г - D=400 \text{ мм}, R=300 \text{ мм}, d=30 \text{ мм}, \delta=4 \text{ мм}$

Комп'ютерну програму, написану для середовища пакета математичного моделювання Maple [148, 149], яка реалізує формоутворення показаних на рис. 2.10 ... 2.12 теоретичних поверхонь, приведено в пункті А.1.1 додатків дисертації. Відповідні твердотільні моделі дисків побудовано засобами систем Autodesk AutoCAD [128], Autodesk Inventor [129] і Dassault Systemes SolidWorks [140, 160].

Рис. 2.13 ілюструє деякі проєктні різновиди дисків іншої, ніж проаналізовано, форми. Це стосується *параболоїдної* (рис. 2.13 а) та *гіперболоїдної* (рис. 2.13 б), угнутих донизу, *еліптичної* (рис. 2.13 в) й *гіперболічної* (рис. 2.13 г) *тороподібних поверхонь*, опуклих догори. Очевидним є факт наявності значно ширшого геометричного розмаїття, яке забезпечує запропонована модель формоутворення робочих поверхонь дисків. Це підтверджує, зокрема, практичне використання програми пункту А.1.1 додатків дисертації.

На рис. 2.14 зображено приклади схожих на диски фігур, придатних для застосування в інших, ніж сільське господарство, сферах життєдіяльності людей.

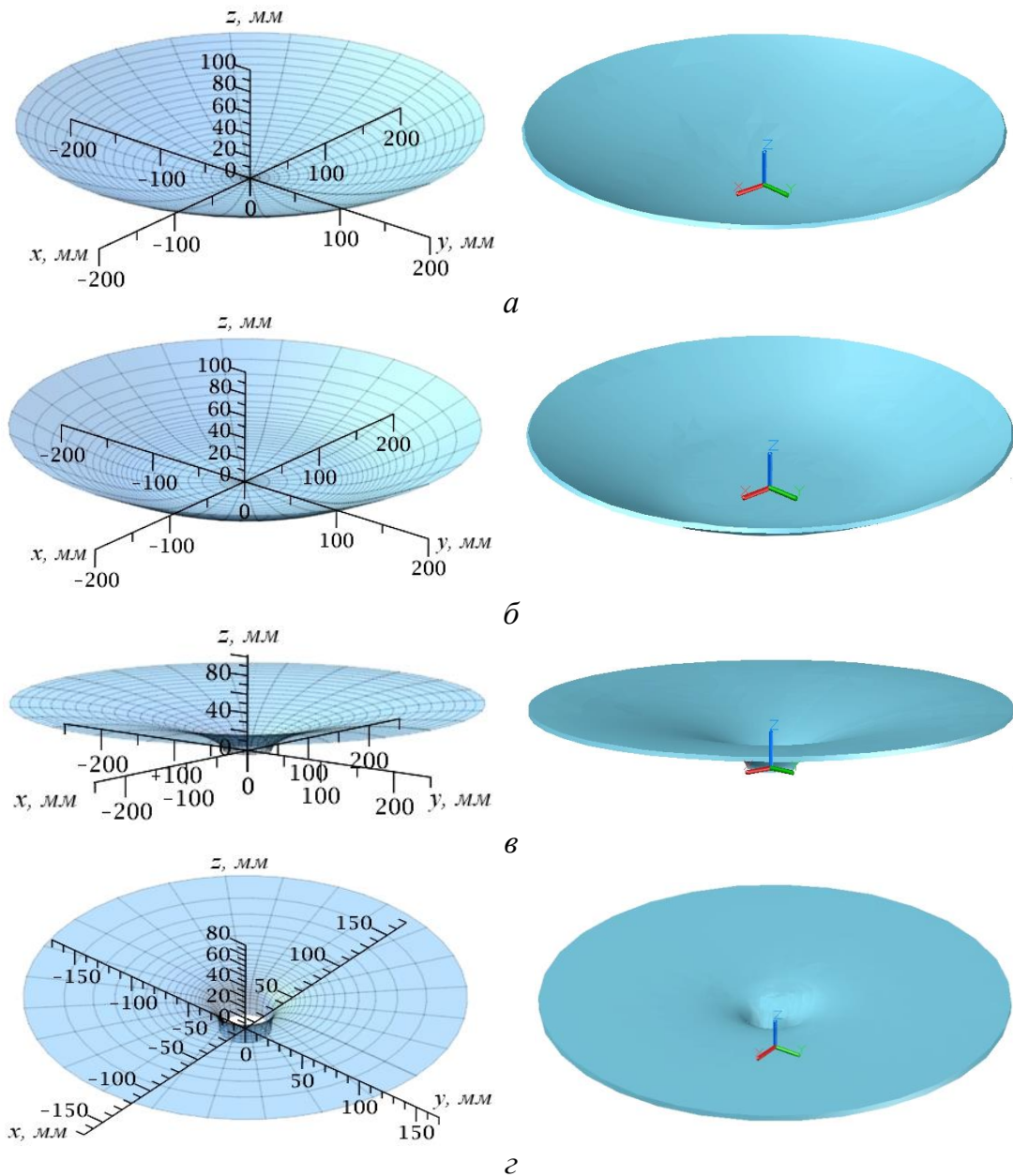


Рис. 2.13. Інші диски:

а – параболоїдні, $D=400$ мм, $d=0$ мм, $h=50$ мм, $w_1=1$, $\mathbf{r}_0=(0$ мм, 0 мм, 0 мм),

$$\mathbf{r}_1=(D/4, 0 \text{ мм}, 0 \text{ мм}), \mathbf{r}_2=(D/2, 0 \text{ мм}, h), \delta=4 \text{ мм};$$

б – гіперболоїдні, $D=400$ мм, $d=0$ мм, $h=50$ мм, $w_1=3$, $\mathbf{r}_0=(0$ мм, 0 мм, 0 мм),

$$\mathbf{r}_1=(D/4, 0 \text{ мм}, 0 \text{ мм}), \mathbf{r}_2=(D/2, 0 \text{ мм}, h), \delta=4 \text{ мм};$$

в – еліптичні тороподібні, $D=500$ мм, $d=50$ мм, $h=50$ мм, $w_1=0,5$,

$$\mathbf{r}_0=(d/2, 0 \text{ мм}, 0 \text{ мм}), \mathbf{r}_1=(d/2, 0 \text{ мм}, h), \mathbf{r}_2=(D/2, 0 \text{ мм}, h), \delta=5 \text{ мм};$$

г – гіперболічні тороподібні, $D=300$ мм, $d=35$ мм, $h=30$ мм, $w_1=3$,

$$\mathbf{r}_0=(d/2, 0 \text{ мм}, 0 \text{ мм}), \mathbf{r}_1=(d/2, 0 \text{ мм}, h), \mathbf{r}_2=(D/2, 0 \text{ мм}, h), \delta=4 \text{ мм}$$

Це ще раз доводить достатньо широку номенклатуру об'єктів, яку охоплює запропонована параметрична модель формоутворення дисків.

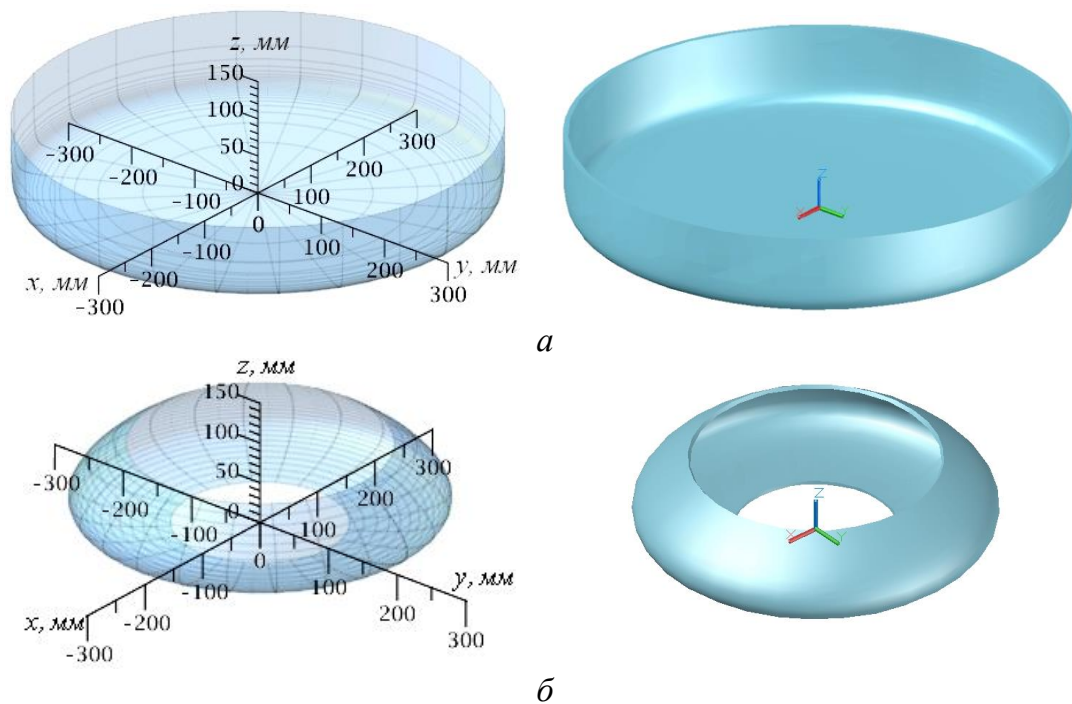


Рис. 2.14. Моделі для іншого використання:

a – $D=600$ мм, $d=0$ мм, $h=100$ мм, $w_1=10$, $\mathbf{r}_0=(0$ мм, 0 мм, 0 мм),

$\mathbf{r}_1=(D/2, 0$ мм, 0 мм), $\mathbf{r}_2=(D/2, 0$ мм, $h)$, $\delta=6$ мм;

б – $D=600$ мм, $d=200$ мм, $h=100$ мм, $w_1=1$, $\mathbf{r}_0=(d/2, 0$ мм, 0 мм),

$\mathbf{r}_1=(D/2, 0$ мм, 0 мм), $\mathbf{r}_2=(3 \cdot d/4, 0$ мм, $h)$, $\delta=5$ мм

На завершення частини цього підрозділу, яку присвячено теоретичним поверхням дискових робочих органів, порівняємо їхнє розмаїття з опрацьовуваними в докторській дисертації [118]. У ній базові поверхні дисків визначаються множиною

$$\Phi_{БП} = (\Phi_{БП_i})_{i=1}^{N_{\Phi_{БП}}} = (\Phi_{БП_i})_{i=1}^4, \quad (2.24)$$

де $\Phi_{БП_1}$ – плоска, $\Phi_{БП_2}$ – конічна, $\Phi_{БП_3}$ – сферична, $\Phi_{БП_4}$ – комбінована.

В останньому випадку можливі варіанти

$$\Phi_{БП_4} = (\Phi_{БП_{4_j}})_{j=1}^{N_{\Phi_{БП_4}}} = (\Phi_{БП_{4_j}})_{j=1}^4, \quad (2.25)$$

де $\Phi_{БП_{41}}$ – плоско-конічна, $\Phi_{БП_{42}}$ – плоско-сферична, $\Phi_{БП_{43}}$ – з конічних, $\Phi_{БП_{44}}$ – зі сферичних.

Наведені вище матеріали свідчать, що запропонована в даному дослідженні узагальнена модель формоутворення дисків охоплює всі, крім

комбінованих, поверхні кортежу (2.24). На додаток забезпечується ще побудова еліпсоїдних, параболоїдних, гіперболоїдних, торових та еліптичних, параболічних і гіперболічних тороподібних поверхонь. Це є суттєвим зростанням наявних спроможностей належного геометричного моделювання. Очевидне також значне збільшення відповідних елементів (2.25).

У загальному випадку дискові знаряддя для механічного обробітку ґрунту можуть по своєму периметру бути не тільки гладкими, а й мати певні вирізи. У дисертації [118] останні визначаються як

$$BP3 = (BP3_i)_{i=1}^{N_{BP3}} = (BP3_i)_{i=1}^5, \quad (2.26)$$

де $BP3_1$ – без вирізів, $BP3_2$ – складені прямолінійні контури, $BP3_3$ – дуги кіл, $BP3_4$ – хвилясті, $BP3_5$ – асиметричні.

Для другого елемента множини (2.26)

$$BP3_2 = (BP3_{2j})_{j=1}^{N_{BP3_2}} = (BP3_{2j})_{j=1}^2, \quad (2.27)$$

де $BP3_{21}$ – V-подібні, $BP3_{22}$ – трапецеїдальні;
четвертого

$$BP3_4 = (BP3_{4j})_{j=1}^{N_{BP3_4}} = (BP3_{4j})_{j=1}^2, \quad (2.28)$$

де $BP3_{41}$ – циклоїдальні, $BP3_{42}$ – синусоїдальні.

Деякі приклади застосування до напрацьованих твердотільних комп'ютерних моделей дисків вирізів (2.26) ... (2.28) показано на рис. 2.15. Це стосується плоских, конічних і сферичних знарядь та V-подібних, трапецеїдальних, дугових колових, циклоїдальних, асиметричних вирізів.

Подані вище ілюстрації доповнюються інформацією пункту А.1.2 додатків дисертації, присвяченому концептуальним моделям дисків, які використовуються на етапі ескізного проектування знарядь для механічного обробітку ґрунту. Зазначимо, що наведені вироби придатні для свого застосування не тільки в сільському господарстві, а й в інших галузях життєдіяльності людей.

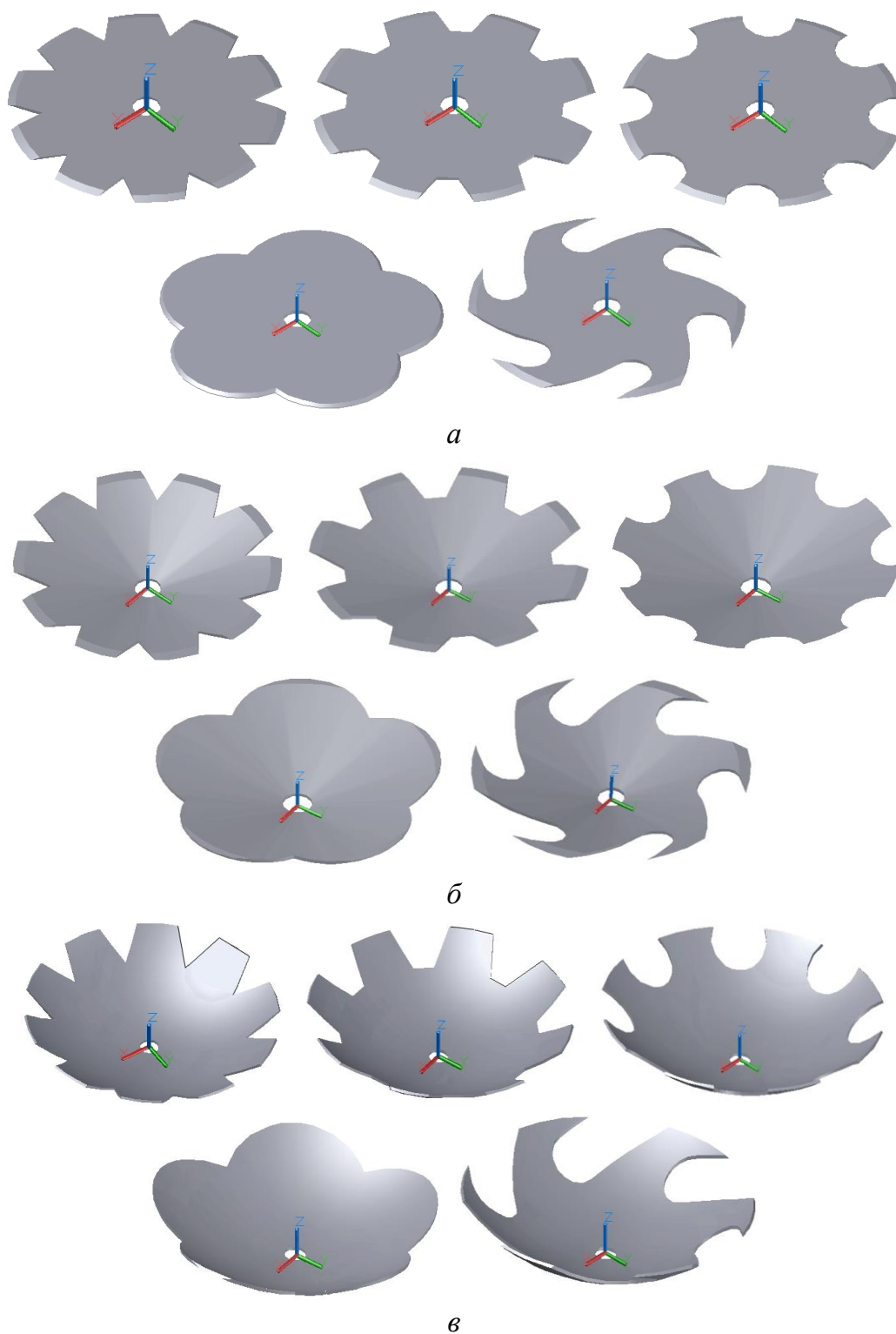


Рис. 2.15. Приклади вирізів на дисках:

а – плоских; *б* – конічних; *в* – сферичних

Слід також зауважити, що завдання даного дослідження не полягають в аналізі доволі широкої номенклатури дисків, розглянутих у цьому підрозділі дисертації. Указане може становити предмет відповідних подальших наукових розвідок. Головною ж метою є напрацювання належного математичного

апарату для інтегрованого варіантного моделювання конструкційно-експлуатаційних геометричних параметрів і характеристик знарядь для механічного обробітку ґрунту на прикладі дискових сошників і підгортачів. Тому перейдемо далі до викладення запропонованого методу граничних оцінок впливу профілю борозни на експлуатаційні енергетичні характеристики сільськогосподарської техніки [150].

2.3. Метод граничних оцінок впливу профілю борозни на експлуатаційні енергетичні характеристики ґрунтообробних знарядь

Згідно з поставленими в дисертації основними завданнями необхідно показати доцільність використання інтегрованого підходу до моделювання конструкційно-експлуатаційних геометричних параметрів та характеристик дискових знарядь для механічного обробітку ґрунту на засадах методології структурно-параметричного формоутворення. На поточний момент у зазначеному плані подано належну концепцію та узагальнену модель формоутворення робочих поверхонь дисків.

Як свідчать проаналізовані в першому розділі літературні джерела, головною проблемою щодо дефініції оптимальних енергетичних показників механічного обробітку ґрунту є широке розмаїття існуючих умов. Це стосується, зокрема, *використовуваних тракторів з відповідними потужностями та робочими швидкостями руху; наявних станів ґрунтів*, тобто таких їхніх властивостей, як *механічний склад* (піщані, глинисті, суглинки, чорнозем), *структура* (тверда, грудкувата, пухка), вологість, попередні сільськогосподарські культури, відсоток гумусу, аерація і т. п.; *застосовувані знаряддя* (полицеві, дискові, чизельні); *експлуатаційні параметри та характеристики* (глибина обробітку, швидкість руху знаряддя, отримувана борозна, продуктивність, економічність, агротехнічна якість і т. д.).

У цьому розділі дисертації запропоновано *метод граничних оцінок впливу профілю борозни на енергетичні характеристики ґрунтообробних знарядь*. Принципова його відмінність від викладених у літературі методик полягає в

наступному. В опрацьованих виданнях аналізуються певні конструкційно-експлуатаційні параметри ґрунтообробних знарядь, наприклад, діаметри дисків, кути їхнього встановлення, глибини обробітку тощо, але для конкретних тракторів та експлуатаційних швидкостей, використовуваних ґрунтів, їхнього стану і т. п. При цьому здійснюються спроби узагальнити та екстраполювати отримані результати на інші умови. Однак, як буде показано нижче, число можливих комбінаторних варіантів наведених факторів фактично нескінченне. Отже, виконані на зазначених теоретичних засадах наукові дослідження мають практичну цінність тільки у випадку, коли наявні умови сільсько-господарського виробництва достатньо точно збігаються з проаналізованими. А як бути в інших випадках? Деякою мірою на вирішення цього складного питання і спрямований запропонований метод граничних оцінок впливу профілю борозни на енергетичні характеристики ґрунтообробних знарядь. Його базова ідея полягає у відштовхуванні від існуючих обставин господарювання та визначенні перспективних напрямків їхнього покращення. Перейдемо далі до більш докладного опису вказаного підходу.

Відомо, що виконувана механічна робота ґрунтообробного знаряддя L_3 при сталих режимах експлуатації (або належних середніх значеннях за певний проміжок часу) визначається формулою

$$W_{L_3} = F_{L_3} \cdot L_{L_3}, \quad (2.29)$$

де F_{L_3} – сила опору ґрунту руху знаряддя;

L_{L_3} – пройдений шлях.

У залежності (2.29) вважається, що опрацьовувані ґрунтообробні знаряддя переміщуються по прямій з постійною швидкістю. Тому загальна сила тяги, що прикладена до них, діє вздовж зазначеної траєкторії, дорівнює силі опору ґрунту руху знаряддя, має протилежний з нею напрям. Під терміном «загальна сила тяги» мається на увазі сумарний її ефект. Наприклад, переміщення під гору знижує реальне тягове зусилля трактора, а згори, навпаки, збільшує і т. д. Також «сила опору ґрунту руху знаряддя» до свого

складу включає, як безпосередній опір деформованого ґрунту, так і додаткові складові, пов'язані, зокрема, з особливостями використовуваної конструкції, її експлуатаційним станом тощо. Ще раз акцентуємо, що запропонований метод граничних оцінок впливу профілю борозни на експлуатаційні енергетичні характеристики ґрунтообробних знарядь застосовує середні за певний час $T_{ГЗ}$ параметри, властивості і т. п.

Якщо ліву та праву частину виразу (2.29) поділити на досліджуваний проміжок часу $T_{ГЗ}$, то отримаємо

$$P_{ГЗ} = \frac{W_{ГЗ}}{T_{ГЗ}} = F_{ГЗ} \cdot \frac{L_{ГЗ}}{T_{ГЗ}} = F_{ГЗ} \cdot V_{ГЗ}, \quad (2.30)$$

де $P_{ГЗ}$ – потрібна потужність;

$V_{ГЗ}$ – експлуатаційна швидкість руху знаряддя.

Компоненти $F_{ГЗ}$ та $V_{ГЗ}$ формули (2.30) є функціями багатьох різноманітних чинників. Наприклад,

$$F_{ГЗ} = f_{ГЗ}(ВГ, ГЗ, ПО, ...), \quad (2.31)$$

де *властивості ґрунту*

$$ВГ = (МС, СГ, ВЛ, ПК, ГМ, АР, ...); \quad (2.32)$$

його *механічний склад*

$$МС = (ПГ, ГГ, СГ, ЧЗ, ...), \quad (2.33)$$

де $ПГ$ – піщані ґрунти, $ГГ$ – глинисті ґрунти, $СГ$ – суглинки, $ЧЗ$ – чорнозем;
структура ґрунту

$$СГ = (ТВ, ГР, ПХ, ...), \quad (2.34)$$

де $ТВ$ – тверда, $ГР$ – грудкувата, $ПХ$ – пухка;

$ВЛ$ – вологість ґрунту, $ПК$ – попередні сільськогосподарські культури, $ГМ$ – відсоток гумусу, $АР$ – аерація ґрунту;

ґрунтообробні знаряддя

$$ГЗ = (ПЛЦ, ДСК, ЧЗЛ, ...), \quad (2.35)$$

де $ПЛЦ$ – полицеві, $ДСК$ – дискові, $ЧЗЛ$ – чизельні;

параметри обробітку

$$ПО = (a, V_{ГЗ}, A, \dots), \quad (2.36)$$

де a – глибина обробітку, $V_{ГЗ}$ – швидкість руху ґрунтообробного знаряддя, A – площа профілю борозни.

Функціональну залежність для швидкості знаряддя, як складової тракторного агрегату, можна подати у вигляді

$$V_{ГЗ} = \frac{P_{ТР} \cdot k_{nnТР}}{n_{ГЗ} \cdot F_{ГЗ}}, \quad (2.37)$$

де $P_{ТР}$ – номінальна потужність трактора;

коефіцієнт $k_{nnТР}$ передавання потужності трактора до сільсько-господарських знарядь

$$0 < k_{nnТР} < 1, \quad (2.38)$$

$n_{ГЗ}$ – число агрегованих ґрунтообробних знарядь.

Отже, експлуатаційні енергетичні показники, див. вирази (2.29) ... (2.38), залежать від багатьох параметрів і характеристик. Тому точно їх відобразити одним універсальним аналітичним математичним апаратом доволі проблематично. Розв'язання вказаної складної задачі пропонується здійснювати поділом останньої на кілька більш простих.

Зростання швидкості руху (2.37) сільськогосподарських знарядь підвищує продуктивність агротехнічних процесів. Аналіз даної формули показує, що цьому сприяє збільшення потужності $P_{ТР}$ трактора та коефіцієнта $k_{nnТР}$ її передавання ґрунтообробним засобам. Однак, перший зазначений напрямок вимагає належних енергетичних, фінансових та інших витрат. Другий важливий, але не відповідає тематиці даного наукового дослідження. Зростання кількості агрегованих знарядь $n_{ГЗ}$ сповільнює швидкість їхнього руху, але збільшує опрацьовану земельну ділянку. Тому ця величина потребує дефініції оптимального значення. Найдоцільнішим є зменшення сили $F_{ГЗ}$ опору ґрунту та знаряддя. Останньому питанню і присвячено цей підрозділ дисертації.

Головна ідея запропонованого методу граничних оцінок впливу профілю борозни на енергетичні характеристики ґрунтообробних знарядь полягає у використанні накопленого досвіду обробітку певних сільськогосподарських земель. Це стосується як малих, так і великих аграрних підприємств. Кожне з них опрацьовує поля з конкретними властивостями ґрунтів (2.32), їхнім механічним складом (2.33), структурою (2.34). Наявні також статистичні відомості про вологість ґрунту, його гумус, аерацію, попередні посіяні культури тощо. Є дані про ґрунтообробні знаряддя (2.35), належні параметри обробітку (2.36), застосовувані трактори, їхні технічні властивості. Існують і відповідні результати господарювання. Постає питання як покращити останні, наприклад, стосовно підвищення урожайності, продуктивності, зменшення витрат енергії, фінансів тощо.

Прийоми запропонованого методу спираються на дефініцію аналітичних залежностей між певними параметрами конструкції агротехнічних засобів (для досліджуваних ґрунтообробних знарядь це діаметри дисків, кути їхнього встановлення, міжрядкові відстані тощо) та отримуваними експлуатаційними показниками, пов'язаними з енергетичними витратами. У нашому випадку це стосується глибини обробітку, профілю борозни, площі її поперечного перерізу і т. п. Збільшення або зменшення наведених величин дозволяє оцінити можливе зростання або спадання використання пального та інших ресурсів на реалізацію агротехнічних процесів.

У напрацьованому методі накопичений досвід обирається в якості відправної точки виконуваної оптимізації. Бажані покращення здійснюються з урахуванням аналітично визначених граничних оцінок впливу профілю борозни на експлуатаційні енергетичні характеристики ґрунтообробних знарядь. Як видно з формул (2.30) ... (2.38), для певних існуючих властивостей ґрунту (механічного складу, структури, вологості, попередніх культур і т. д.), застосовуваних знарядь, параметрів обробітку (необхідної глибини, швидкості експлуатаційного руху, профілю борозни, площі її поперечного перерізу тощо) та наявних тракторів досягаються деякі аграрні результати завдяки конкретним енергетичним витратам.

Підвищення продуктивності, тобто $V_{ГЗ}$ та $n_{ГЗ}$ за рахунок зростання потужності $P_{ТР}$, див. залежність (2.37), є очевидним, однак це не поліпшує енергозбереження. Збільшення коефіцієнта $k_{nn_{ТР}}$ важливе, але не відповідає обраній тематиці даного наукового дослідження. Вище вже вказувалося, що найбільш ефективний шлях полягає в мінімізації сили опору $F_{ГЗ}$ ґрунту та знаряддя. Тоді, при сталих інших експлуатаційних параметрах, підвищується продуктивність праці за рахунок зростання $V_{ГЗ}$ або знижуються енергетичні витрати у вигляді зменшення потрібної потужності $P_{ТР}$.

Зрозуміло, що більш мілка глибина обробітку при однаковій формі профілю борозни забезпечує зниження витрат енергії, але, одночасно здатна призводити до небажаних аграрних наслідків. Перспективним є напрямок гнучкого керування потрібною геометрією поперечного перерізу борозни при різних глибинах обробітку. Але знову виникає питання кількісного визначення збільшення або зменшення відповідних енергетичних витрат. Сутність запропонованого методу граничних оцінок впливу профілю борозни на експлуатаційні енергетичні характеристики ґрунтообробних знарядь полягає в аналітичній дефініції площі поперечного перерізу борозни для різних конструкційно-експлуатаційних параметрів, які її визначають, та подальшому відстеженні її змінювання при варіюванні вказаних величин. Отримані математичні залежності дозволяють кількісно відображувати те, що збільшення або зменшення площі поперечного профілю борозни, при решті сталих умов, призводить до відповідного зростання або спадання опору ґрунту діючим на нього знаряддям. Наприклад, якщо при певній наявній глибині обробітку розглядаються два її нових варіанти (один мілкіший, а інший глибший), то очевидно, що перший економить енергетичні витрати, але може обумовити погіршення сільськогосподарських показників. У другому випадку все навпаки. Оцінювання аграрних факторів, на відміну від енергетичних, не відноситься до предмета досліджень даної дисертації. Наявність аналітичних залежностей між конструкційними параметрами знарядь, глибиною обробітку та площею поперечного перерізу борозни дозволяє кількісно визначати зменшення або збільшення енергетичних витрат.

Запропонований метод граничних оцінок впливу профілю борозни на енергоефективність ґрунтообробних знарядь докладно проілюстровано на прикладі дводискових сошників у наступному розділі дисертації. Зазначимо, що проаналізований підхід може бути поширено на інші подібні засоби й не тільки сільськогосподарської техніки. Але це становить завдання подальших наукових досліджень.

Висновки до розділу 2

У даній частині дисертації викладено теоретичні засади запропонованого підходу до інтегрованого математичного та комп'ютерного моделювання конструкційно-експлуатаційних геометричних параметрів дискових знарядь для механічного обробітку ґрунту. Наведене слугує належною базою для опрацювання в наступних розділах конкретних відповідних виробів.

Подані вище відомості знайшли своє відображення в публікаціях [10 ... 12, 17, 20, 23, 150, 175], виконаних за участю автора дисертації.

Було отримано наступні нові наукові результати.

1. Показано доцільність використання інтегрованого підходу до моделювання конструкційно-експлуатаційних геометричних параметрів і характеристик дискових знарядь для механічного обробітку ґрунту на засадах методології структурно-параметричного формоутворення, що послугувало загальною теоретичною основою для проведення даних досліджень.

2. Розроблено концепцію та базовий математичний апарат інтегрованого моделювання конструкційно-експлуатаційних геометричних параметрів та характеристик дискових сошників і підгортачів, що визначило основні напрямки їхнього подальшого опрацювання.

3. Розроблено узагальнену модель формоутворення поверхонь дисків як складову СПГМ, що завдяки широкому охопту різноманітної номенклатури забезпечує підвищення ефективності автоматизованого проєктування.

4. Запропоновано метод граничних оцінок впливу профілю борозни на експлуатаційні енергетичні характеристики ґрунтообробних знарядь. Це

дозволяє на підставі належних аналітичних залежностей кількісно оцінювати ефективність використання відповідних ресурсів.

5. Удосконалено теорію автоматизованого варіантного проєктування виробів машинобудування запропонованими інтегрованими конструкційно-експлуатаційними геометричними моделями дискових знарядь для механічного обробітку ґрунту.

6. Отримала подальший розвиток методологія структурно-параметричного формоутворення технічних об'єктів машинобудування шляхом розширення застосування принципу інтеграції на визначення конструкційно-експлуатаційних геометричних параметрів і характеристик дискових сошників та підгортачів.

Таким чином, другий розділ дисертації містить запропоновані теоретичні засади, напрацьовані на їхній основі нові методи, прийоми та моделі інтегрованого варіантного проєктування конструкційно-експлуатаційних геометричних параметрів і характеристик дискових знарядь для механічного обробітку ґрунту. Зазначені відомості слугують базою для виконаного далі комп'ютерного формоутворення дискових сошників і підгортачів.

РОЗДІЛ 3

МОДЕЛЮВАННЯ ДВОДИСКОВИХ СОШНИКІВ

Цю частину дисертації присвячено безпосередньому моделюванню конкретних ґрунтообробних знарядь, а саме, сільськогосподарських дводискових сошників. Перспективність зазначених засобів висвітлено в першому розділі даного наукового дослідження.

Розглянуто питання стосовно концептуальної конструкції вказаних знарядь, запропоновано спосіб керування отримуваним профілем борозни за допомогою кутів позиціонування дисків на основі встановлених відповідних аналітичних залежностей, проілюстровано викладений у другому розділі метод граничних оцінок впливу профілю борозни на експлуатаційні енергетичні характеристики дводискових сошників, чим забезпечено належну оптимізацію останніх.

3.1. Концептуальна конструкція універсальних дводискових сошників

Як зазначалось у вступі, на нинішньому тяжкому історичному етапі розвитку України, пов'язаному з воєнними діями на її території, стратегічною галуззю економіки нашої держави є сільське господарство. У зазначених умовах підвищення його ефективності являє собою актуальну проблему. Одним із перспективних напрямків її вирішення вважається вдосконалення дискових ґрунтообробних знарядь. Їхні переваги, в порівнянні з іншими відповідними засобами, полягають у зменшенні витрат енергії для реалізації належних агротехнічних процесів, кращому забезпеченні збереження корисних властивостей ґрунту, більшій відповідності сучасним екологічним вимогам.

Завданням даного підрозділу дисертації є висвітлення запропонованого комп'ютерного концептуального геометричного моделювання дводискових сошників, виконаного з використанням структурно-параметричної методології формування.

Розглянутий підхід до проектування сошників забезпечує комплексне врахування наявних конструкційно-експлуатаційних вимог до даних знарядь. Наприклад, мається на увазі визначення раціональних кутів встановлення дисків у горизонтальній площині відносно напрямку їхнього поступального руху, потрібних вертикальних відхилень, а також запропонованого додаткового керування. Критерієм успішності розв'язання вказаних задач є необхідний профіль борозни в залежності від глибини обробки ґрунту. Одержані результати ілюструють створені комп'ютерні геометричні твердотільні моделі дискових сошників та побудовані належні графіки.

Далі подано методику автоматизованого формоутворення елементів сошників, яка базується на структурно-параметричному підході, поєднує, з метою синтезу варіантів та їх оптимізації, конструкційні й експлуатаційні параметри та характеристики вказаних дискових ґрунтообробних знарядь.

На рис. 3.1 зображено основні складові концептуальної конструкції узагальненого різновиду з регулювальним кронштейном (див. підрозділ 2.1) опрацьовуваного сошника, які формують важливу експлуатаційну характеристику у вигляді потрібного профілю борозни. Зауважимо, що задачі внесення насіння та добрив, їх присипання землею, відповідні конструкційні елементи не аналізуються, оскільки становлять предмет наступних наукових досліджень.

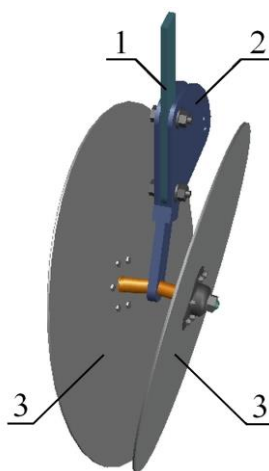


Рис. 3.1. Концептуальна конструкція сошника:

1 – стояк; 2 – регулювальний кронштейн з осями; 3 – диск із маточиною та вальницею

Порядок комп'ютерного варіантного структурно-параметричного формоутворення дводискових сошників на стадії ескізного проєктування викладено в підрозділі 2.1. У даній частині дисертації розглядається вплив використовуваних величин діаметрів D плоских дисків і кутів α , β , γ їх позиціонування (див. рис. 3.2) на профіль борозни залежно від глибини a обробітку ґрунту.

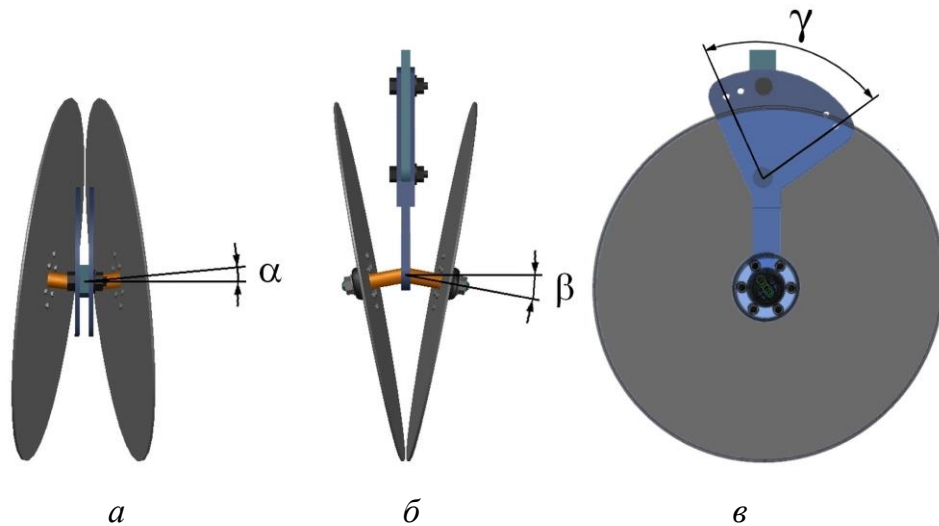


Рис. 3.2. Кути α , β , γ встановлення дисків та види на сошник:

a – зверху; b – за напрямом руху знаряддя; c – з правого боку

З поданих вище зображень видно, що:

- кут α являє собою величину повороту дисків у горизонтальній площині від напрямку руху сошника;
- кут β визначає відхилення дисків від вертикалі, тобто в поперечній площині;
- кут γ забезпечує дискретне позиціонування дисків, реалізує раціональне керування їхньою адаптацією до наявних експлуатаційних умов шляхом належного повороту навколо осі, перпендикулярної до площини симетрії знаряддя.

Для аналітичних описів далі використовується прямокутна система координат $Oxyz$, де її початок відповідає точці перетину невідхиленої осі обертання дисків із площиною симетрії знаряддя. При цьому вісь x за напрямом протилежна його переміщенню, y – горизонтальна, z – вертикальна.

Опрацюємо наступні варіанти проєктних параметрів сошника, представлені множинами:

$$D = (D_i)_{i=1}^{N_D} = (D_i)_{i=1}^3 = (D_1, D_2, D_3) = (300 \text{ мм}, 350 \text{ мм}, 400 \text{ мм}), \quad (3.1)$$

$$\alpha = (\alpha_i)_{i=1}^{N_\alpha} = (\alpha_i)_{i=1}^3 = (\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3) = (5^0, 7^0, 10^0), \quad (3.2)$$

$$\beta = (\beta_i)_{i=1}^{N_\beta} = (\beta_i)_{i=1}^3 = (\beta_1, \beta_2, \beta_3) = (5^0, 7^0, 10^0), \quad (3.3)$$

$$\gamma \in [-30^0, 60^0], \quad (3.4)$$

$$x_c = 0 \text{ мм}, z_c = 110 \text{ мм}, \quad (3.5)$$

де x_c, z_c – координати розташування осі для кута γ , який відміряється проти годинникової стрілки (див. рис. 3.2 в).

У процесі автоматизованого проєктування застосовано викладений у наступному підрозділі дисертації аналітичний апарат визначення профілю поперечного перерізу борозни, утворюваного дводисковим сошником для параметрів (3.1) ... (3.5). Отримані результати представлено на рис. 3.3 відповідними графіками та поряд, із правого боку, розробленими належними конструкціями. Зазначені відомості унаочнюють певні умови експлуатації даного знаряддя. При цьому також застосовано ефективний принцип щодо проєктування універсальних сівалок з широким спектром їхнього практичного використання в багатоманітних умовах. Мається на увазі можливість здійснення звичайної (рис. 3.3 а, б) та вузькорядної (рис. 3.3 в, г) сівба шляхом виконання необхідних налаштувань сільськогосподарського наряддя.

Для дефініції раціональних варіантів сошників у першому випадку обрано два наступні критерії. Це зменшення гребня в середині борозни та невелика площа ділянки між дисками для визначеної глибини обробітку ґрунту. У другому – це потреба реалізації ширини міжрядь 75 ... 85 мм. Таку конструкцію сошників наведено у зменшеному масштабі праворуч від показаних графіків.

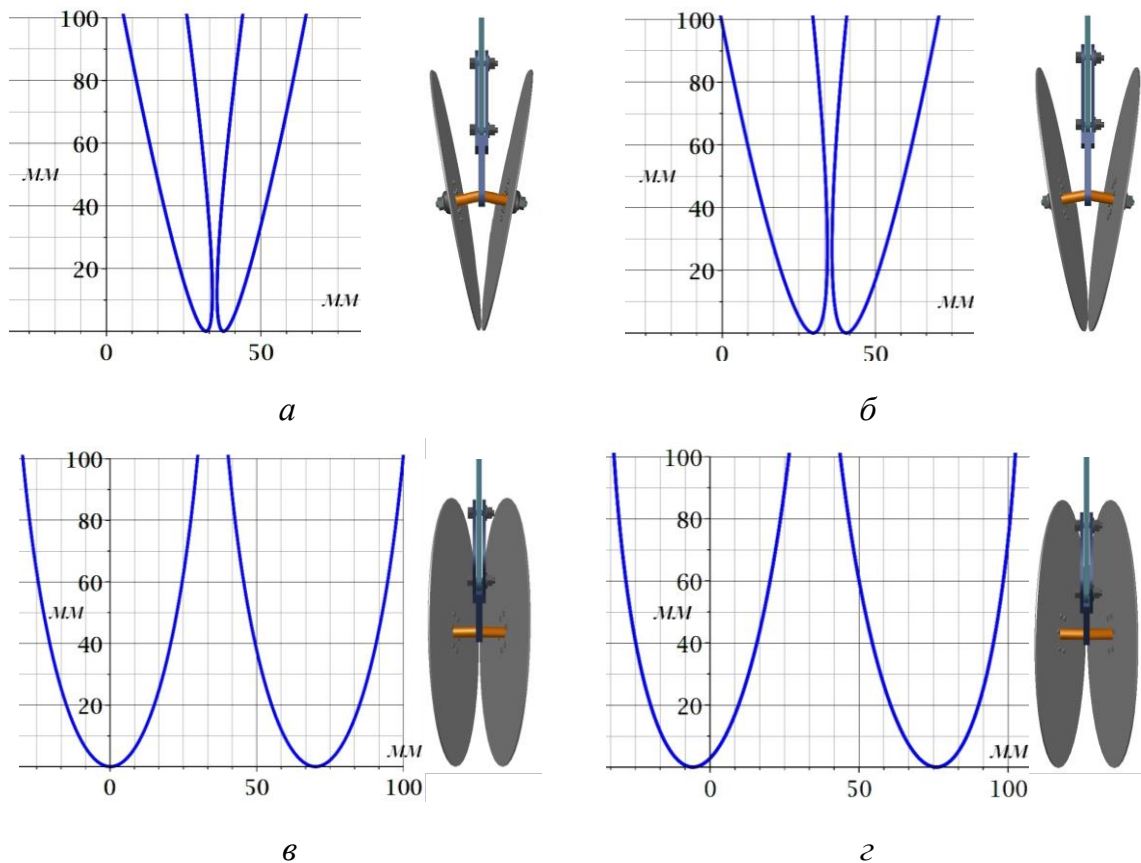


Рис. 3.3. Деякі опрацьовані різновиди сошника:

$$D=400 \text{ мм}, \alpha=7^{\circ}, \beta=7^{\circ}, x_c=0 \text{ мм}, z_c=110 \text{ мм},$$

$$a - \gamma=-25^{\circ}; \text{ б} - \gamma=-15^{\circ}; \text{ в} - \gamma=45^{\circ}; \text{ г} - \gamma=55^{\circ}$$

Додаткові ілюстративні приклади стосовно розглянутих дискових знарядь подано в підрозділі А.2.додатків.

На рис. 3.4 зображено фрагмент кресленника (вид з правого боку на сошник), а на рис. 3.5 – аксонометрію регулювального кронштейна, що забезпечує отримання проаналізованих профілів борозни завдяки належному розташуванню його осі обертання та фіксуючих отворів.

Отже, в даному підрозділі дисертації представлено базові прийоми розробленої методики для здійснення раціонального комп'ютерного формоутворення дводискових сошників на засадах структурно-параметричного підходу та комплексного взяття до уваги наявних конструкційно-експлуатаційних вимог. Акцентуємо, що викладені відомості можуть потребувати свого подальшого узагальнення. Це обумовлює предмет наступних відповідних наукових досліджень.

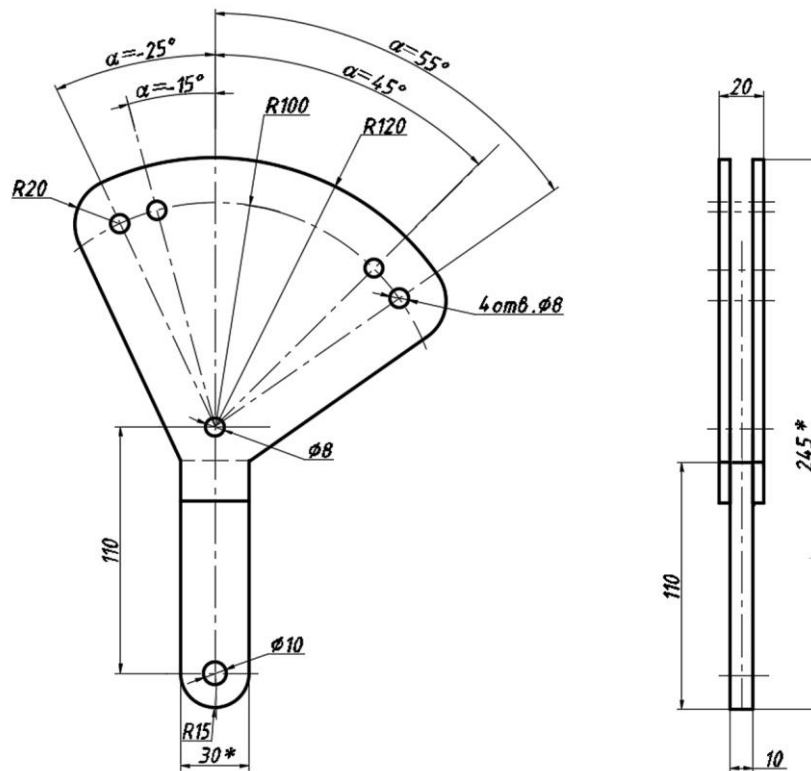


Рис. 3.4. Фрагмент кресленика регулювального кронштейна

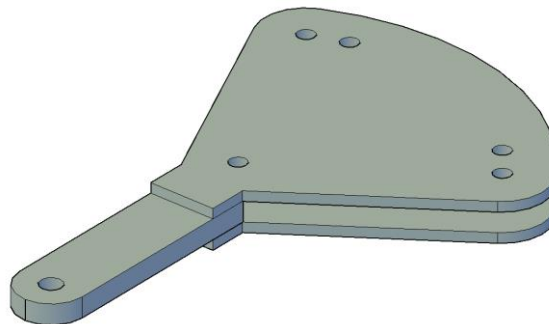


Рис. 3.5. Аксонометричний вид комп'ютерної твердотільної моделі кронштейна

Представлений вище спосіб керування отримуваним профілем борозни за допомогою належних кутів встановлення дисків спирається на визначені відповідні аналітичні залежності. Доведення цих формул, які поєднують потрібні конструкційні та експлуатаційні параметри й характеристики дводискових сошників, викладається в підрозділі 3.2 дисертації. Зазначимо, що головною науковою новизною в окресленому плані є запропонований математичний апарат, який описує застосування в якості додаткової величини керування кут γ повороту даного знаряддя навколо осі, перпендикулярної до площини його симетрії.

3.2. Керування отримуваним профілем борозни за допомогою кутів позиціонування дисків

Матеріали даного підрозділу є подальшим розвитком прийомів моделювання профілю борозни, викладених у публікації [22]. Це стосується їхнього застосування не тільки для дискових плугів, луцильників і борін, а й поширення на інші конструкції та аграрні технології. Зокрема, для мінімальної механічної обробки ґрунту такими багатофункціональними комбінованими сільськогосподарськими знаряддями, як дискові сошники. Останнє, з метою оптимізації експлуатаційних характеристик, обумовило потребу опрацювання впливу не тільки кутів α та β , тобто позиціонування дисків у горизонтальній площині та відносно вертикалі, а й додаткового керування у вигляді кута γ повороту знаряддя навколо осі, перпендикулярної до його площини симетрії.

3.2.1. Математичний апарат

На початку розглянемо більш просту конструкцію дводискового сошника (див. рис. 3.6) без регулювального кронштейна.

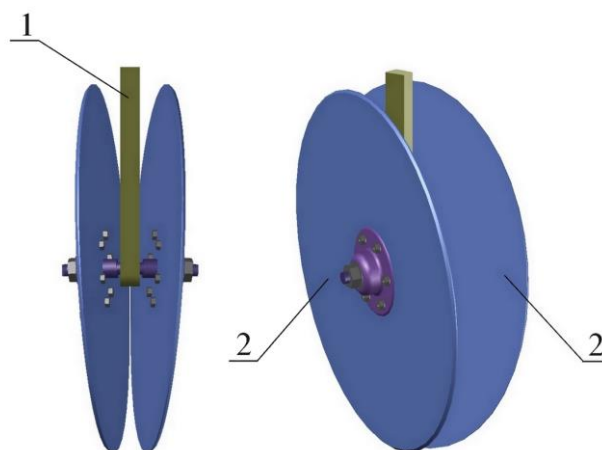


Рис. 3.6. Основні концептуальні конструкційні складові дводискового сошника:

1 – стояк з осями; 2 – диск із матчиною та вальницею

Ліве зображення – це вид за напрямом робочого руху сошника, а праве – відповідає аксонометричній проєкції. Диски встановлені симетрично відносно поздовжньої вертикальної площини симетрії знаряддя з кутом β відхилення від

вертикалі та поворотом на кут α в горизонтальній площині. Під час свого функціонування диски обертаються, розрізають ґрунт, розсувають і ущільнюють його, формуючи борозну. Її профіль залежить від діаметра D дисків, необхідної глибини a обробітку, кутів α та β , які визначають положення точки сходження, що відповідає мінімальній відстані між дисками. У залежності від величини наведених кутів розрізняють сошники звичайні і для вузькорядної сівби. В останньому випадку утворюються дві близько розташовані борозни.

Наша мета полягає в дефініції аналітичних співвідношень між наведеними конструкційними та експлуатаційними параметрами. Зазначений математичний апарат надалі узагальнюється застосуванням додаткової величини керування у вигляді кута γ повороту знаряддя навколо осі, перпендикулярної до площини його симетрії.

Використаємо прямокутну систему координат $Oxyz$ (рис. 3.7), абсциса x якої протилежна напрямку руху сошника, площина Oxy горизонтальна, апліката z вертикальна. Рівняння розташованого у площині Oxz кола діаметром D з центром у точці O та параметром формоутворення кутом u , що відміряється від осі x проти обертання стрілки годинника, має наступний вигляд

$$x = \frac{D}{2} \cos(u), \quad y = 0, \quad z = -\frac{D}{2} \sin(u), \quad (3.6)$$

де $u \in [0^\circ, 360^\circ]$.

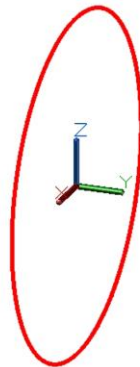


Рис. 3.7. Зовнішнє коло диска, розташованого вертикально
вздовж напрямку руху сошника

Виконаємо обертання кола, яке відтворює диск, навколо осі x на кут β проти годинникової стрілки (рис. 3.8). Початкове його положення показано штриховою лінією.

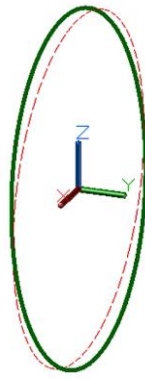


Рис. 3.8. Диск, повернутий навколо осі x

На підставі виразів (3.6) з використанням матриць перетворень в однорідних координатах

$$[x \ y \ z \ 1] \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \beta & \sin \beta & 0 \\ 0 & -\sin \beta & \cos \beta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = [x \ y \cos \beta - z \sin \beta \ y \sin \beta + z \cos \beta \ 1],$$

отримуємо рівняння нового кола

$$x = \frac{D}{2} \cos(u), \ y = \frac{D}{2} \sin \beta \sin(u), \ z = -\frac{D}{2} \cos \beta \sin(u), \quad (3.7)$$

де $u \in [0^0, 360^0]$.

Далі виконуємо його поворот на кут α за годинниковою стрілкою навколо осі z (рис. 3.9), де наведено вид уздовж руху сошника, тонкими лініями зображено попередні положення диска.

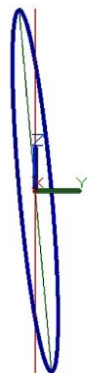


Рис. 3.9. Диск, додатково повернутий навколо осі z

Аналітичний опис побудованої фігури визначаємо на основі співвідношень (3.7) та належних матриць перетворення координат

$$[x \ y \ z \ 1] \cdot \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 & 0 \\ \sin \alpha & \cos \alpha & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = [x \cos \alpha + y \sin \alpha \ -x \sin \alpha + y \cos \alpha \ z \ 1].$$

У результаті для першого (лівого за напрямом руху сошника) диска маємо

$$x = \frac{D}{2}(\cos \alpha \cos(u) + \sin \alpha \sin \beta \sin(u)), \quad y = \frac{D}{2}(\cos \alpha \sin \beta \sin(u) - \sin \alpha \cos(u)),$$

$$z = -\frac{D}{2} \cos \beta \sin(u), \quad (3.8)$$

де $u \in [0^0, 360^0]$.

Точку S сходження дисків ілюструє рис. 3.10.

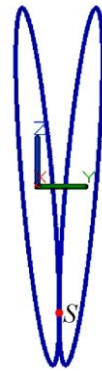


Рис. 3.10. Точка S сходження дисків

Її аналітична дефініція здійснюється з використанням ординати виразу (3.8), тобто

$$y'(u) = \frac{D}{2}(\sin \alpha \sin(u) + \cos \alpha \sin \beta \cos(u)) = 0. \quad (3.9)$$

З рівняння (3.9) випливає

$$\operatorname{tg}(u) = -\operatorname{ctg} \alpha \sin \beta, \quad (3.10)$$

де

$$\alpha \in (0^0, 90^0), \quad \beta \in [0^0, 90^0). \quad (3.11)$$

Залежності (3.10) і (3.11) дозволяють визначити необхідний параметр u_S точки S сходження дисків. Для проміжків (3.11) величина (3.10) від'ємна.

Оскільки S знаходиться в передній нижній частині диска, а функція арктангенс має множину значень $(-90^0, 90^0)$, то

$$u_s = \arctg(-\operatorname{ctg}\alpha \sin \beta) + 180^0. \quad (3.12)$$

На підставі розрахованого u_s та формул (3.8) обчислюємо координати точки сходження дисків

$$S = (x_s, y_s, z_s). \quad (3.13)$$

Рис. 3.11 дозволяє оцінити вплив α та β на гребінь. З наведеного графіка поверхні (3.12) видно, що зі збільшенням кута α висота гребеня (точка u_s) підвищується, а зі зростанням кута β – знижується. Встановлені залежності допомагають певним чином керувати потрібним профілем отримуваної борозни.

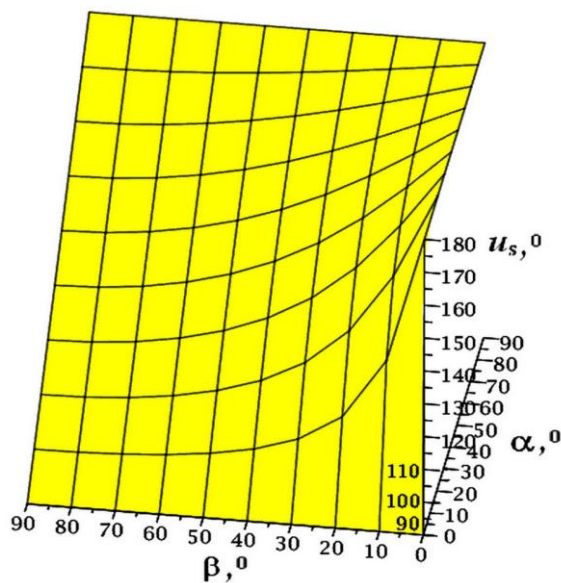


Рис. 3.11. Вплив кутів α та β на висоту гребеня

Рівняння зовнішнього кола другого (правого за напрямом руху сошника) диска отримаємо, застосувавши матриці перетворення координат

$$\begin{aligned}
 [x \ y \ z \ 1] \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -x_s & -y_s & -z_s & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ x_s & y_s & z_s & 1 \end{bmatrix} = \\
 = [x \ 2y_s - y \ z \ 1],
 \end{aligned}$$

ординати (3.13) та залежності (3.8).

Тоді для другого диска

$$\begin{aligned} x &= \frac{D}{2}(\cos\alpha \cos(u) + \sin\alpha \sin\beta \sin(u)), \quad y = 2y_s + \frac{D}{2}(\sin\alpha \cos(u) - \cos\alpha \sin\beta \sin(u)), \\ z &= -\frac{D}{2}\cos\beta \sin(u), \end{aligned} \quad (3.14)$$

де $u \in [0^\circ, 360^\circ]$.

Наведений вище результат перетворення координат можна отримати також взявши до уваги симетрію дисків та використавши співвідношення

$$y_s = \frac{y_1 + y_2}{2},$$

де y_1 та y_2 – це ординати точок першого і другого диска.

Згідно з виразами (3.8) та (3.14) найнижчі точки дисків (див. рис. 3.12) відповідають параметру $u=90^\circ$.

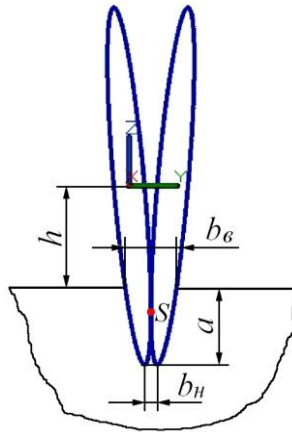


Рис. 3.12. Залежність профілю борозни від глибини a обробітку ґрунту

Отже,

$$\begin{aligned} b_n &= 2y_s + \frac{D}{2}(\sin\alpha \cos(90^\circ) - \cos\alpha \sin\beta \sin(90^\circ)) - \\ &\quad - \frac{D}{2}(\cos\alpha \sin\beta \sin(90^\circ) - \sin\alpha \cos(90^\circ)) = \\ &= 2y_s - D\cos\alpha \sin\beta. \end{aligned} \quad (3.15)$$

На практиці, з урахуванням зазору d_s між дисками в місці їхнього сходження, маємо

$$b_n = 2y_s - D\cos\alpha \sin\beta + d_s. \quad (3.16)$$

На ширину верхньої частини b_g борозни впливає глибина a обробітку ґрунту, її сума з відстанню h до землі на підставі наведеного рисунка й виконаних побудов дорівнює

$$a + h = \frac{D}{2} \cos \beta. \quad (3.17)$$

З використанням аплікат формул (3.8) та (3.14) із співвідношення (3.17) маємо

$$h = \frac{D}{2} \cos \beta - a = \frac{D}{2} \cos \beta \sin(u_\epsilon), \quad (3.18)$$

де u_ϵ – параметр, що відповідає точкам кіл дисків на висоті h .

Спираючись на залежність (3.18), отримуємо

$$u_\epsilon = \arcsin \left(1 - \frac{2a}{D \cos \beta} \right). \quad (3.19)$$

Максимальна глибина обробітку диском згідно з виданням [62] становить приблизно дві третини його радіуса, тобто

$$a_{\max} = \frac{D}{2} \cdot \frac{2}{3} \cdot \cos \beta = \frac{D}{3} \cos \beta. \quad (3.20)$$

На основі співвідношень (3.19) і (3.20)

$$u_{\min} = \arcsin \left(1 - \frac{2a_{\max}}{D \cos \beta} \right) = \arcsin \left(1 - \frac{2D \cos \beta}{3D \cos \beta} \right) = \arcsin \left(\frac{1}{3} \right) \approx 19,5^\circ,$$

$$u_{\max} = 180^\circ - u_{\min} = 180^\circ - 19,5^\circ = 160,5^\circ, \quad (3.21)$$

де $u_{\min}$, $u_{\max}$ – це мінімальна та максимальна величина параметра дуги кола диска, яка формує профіль борозни.

Отже,

$$u \in [u_{\min}, u_{\max}] = [19,5^\circ; 160,5^\circ]. \quad (3.22)$$

Для конкретної дуги

$$u \in [u_\epsilon, 180^\circ - u_\epsilon], u_\epsilon < 90^\circ. \quad (3.23)$$

Значення b_ϵ ширини верхньої частини борозни обчислюється як

$$b_\epsilon = 2y_s + \frac{D}{2} (\sin \alpha \cos(u_\epsilon) - \cos \alpha \sin \beta \sin(u_\epsilon)) -$$

$$\begin{aligned}
& -\frac{D}{2}(\cos \alpha \sin \beta \sin(u_{\epsilon}) - \sin \alpha \cos(u_{\epsilon})) + d_s = \\
& = 2y_s + D(\sin \alpha \cos(u_{\epsilon}) - \cos \alpha \sin \beta \sin(u_{\epsilon})) + d_s.
\end{aligned} \quad (3.24)$$

Отже, співвідношення (3.6) ... (3.24) для розглянутих дводискових сошників аналітично описують їхні базові конструкційно-експлуатаційні геометричні параметри та застосовуються для належного автоматизованого проєктування.

У використовуваній системі координат $Oxyz$ (рис. 3.7) проти напрямку абсциси x здійснюється рух сошника. Розміщення цих знарядь уздовж ординати y забезпечує необхідну ширину міжрядь, а за аплікатою z – потрібну глибину обробітку ґрунту. Крім проаналізованих кутів β та α , тобто відповідно повороту дисків навколо осі x та z , на отримуваний профіль борозни впливає також можливе обертання навколо осі, паралельній ординаті y , на кут γ . З метою узагальнення поданого вище математичного апарату дане питання розглядається далі.

Нехай положення зазначеного центра C повороту визначається координатами

$$C = (x_C, y_C, z_C). \quad (3.25)$$

Дефініція рівнянь кола першого диска виконується на основі матриць перетворення

$$\begin{aligned}
& [x \ y \ z \ 1] \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -x_C & -y_C & -z_C & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \gamma & 0 & -\sin \gamma & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin \gamma & 0 & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ x_C & y_C & z_C & 1 \end{bmatrix} = \\
& = [(x - x_C) \cos \gamma + (z - z_C) \sin \gamma + x_C \ y \ (x_C - x) \sin \gamma + (z - z_C) \cos \gamma + z_C \ 1],
\end{aligned}$$

величин (3.25) та залежностей (3.8).

У результаті цього для першого диска

$$\begin{aligned}
x = & \frac{D}{2}(\cos \alpha \cos(u) + \sin \alpha \sin \beta \sin(u)) \cos \gamma + (1 - \cos \gamma) x_C - \\
& - \left(\frac{D}{2} \cos \beta \sin(u) + z_C \right) \sin \gamma,
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
y &= \frac{D}{2}(\cos \alpha \sin \beta \sin(u) - \sin \alpha \cos(u)), \\
z &= (x_c - \frac{D}{2}(\cos \alpha \cos(u) + \sin \alpha \sin \beta \sin(u))) \sin \gamma + (1 - \cos \gamma) z_c - \\
&\quad - \frac{D}{2} \cos \beta \cos \gamma \sin(u),
\end{aligned} \tag{3.26}$$

де $u \in [0^0, 360^0]$.

Як і для виразів (3.8) та (3.14), що відрізняються через симетрію дисків тільки своїми ординатами, подібну ситуацію маємо також у випадку (3.26). Тому в кола другого диска абсциси й аплікати відповідають останнім наведеним формулам, а ординати – співвідношенню (3.14), оскільки вони не змінилися. Зауважимо, що в залежностях (3.26) величина кута γ може бути як додатною, так і від’ємною. Її конкретний проміжок визначається наявними умовами моделювання.

Порівнюючи формули (3.8) та (3.26), бачимо, що останні перетворюються в попередні при значенні кута $\gamma=0^0$. Це ж стосується і другого диска. Отже, нами *отримано узагальнені аналітичні вирази, які визначають профіль борозни сошника в залежності від діаметрів дисків та трьох кутів їхнього позиціонування.*

Для побудови потрібних графіків профілів борозни необхідна величина найнижчої аплікати (3.26). З метою її дефініції обчислимо відповідний параметр u_n . Для цього знайдемо похідну вказаної функції та прирівняємо її до нуля

$$\frac{D}{2}(\cos \alpha \cdot \sin \gamma \cdot \sin(u) - \sin \alpha \cdot \sin \beta \cdot \sin \gamma \cdot \cos(u) - \cos \beta \cdot \cos \gamma \cdot \cos(u)) = 0. \tag{3.27}$$

На підставі співвідношення (3.27) маємо

$$\operatorname{tg}(u) = \frac{\sin \alpha \cdot \sin \beta \cdot \sin \gamma + \cos \beta \cdot \cos \gamma}{\cos \alpha \cdot \sin \gamma},$$

звідки

$$u_n = \operatorname{arctg}\left(\frac{\sin \alpha \cdot \sin \beta \cdot \sin \gamma + \cos \beta \cdot \cos \gamma}{\cos \alpha \cdot \sin \gamma}\right), \tag{3.28}$$

де $\alpha \in (0^0, 90^0)$, $\beta \in [0^0, 90^0)$, $\gamma \in (-90^0, 90^0)$.

Зауважимо, що при $\gamma=0^0$ у виразі (3.28) $u_n=90^0$.

Таким чином, нами викладено базові теоретичні положення запропонованого математичного апарату щодо керування конструкційно-експлуатаційними параметрами й характеристиками сошника у вигляді діаметрів його дисків, кутів їхнього встановлення та отримуваного при цьому профілю борозни. Далі показано практичну реалізацію поданого підходу.

3.2.2. Конкретні приклади

Нехай потрібно проаналізувати наступні множини величин дводискових сошників:

$$\begin{aligned}
 D &= (D_i)_{i=1}^{N_D} = (D_i)_{i=1}^3 = (300 \text{ мм}, 350 \text{ мм}, 400 \text{ мм}), \\
 \alpha &= (\alpha_i)_{i=1}^{N_\alpha} = (\alpha_i)_{i=1}^3 = (5^0, 8^0, 12^0), \\
 \beta &= (\beta_i)_{i=1}^{N_\beta} = (\beta_i)_{i=1}^6 = (0^0, 5^0, 10^0, 15^0, 20^0, 25^0), \\
 \gamma &= (\gamma_i)_{i=1}^{N_\gamma} = (\gamma_i)_{i=1}^5 = (-25^0, -15^0, 0^0, 45^0, 75^0), \\
 x_C &= (x_{Ci})_{i=1}^{N_{x_C}} = (x_{Ci})_{i=1}^3 = (-20 \text{ мм}, -10 \text{ мм}, 0 \text{ мм}), \\
 z_C &= (z_{Ci})_{i=1}^{N_{z_C}} = (z_{Ci})_{i=1}^3 = (110 \text{ мм}, 130 \text{ мм}, 150 \text{ мм}), \quad (3.29)
 \end{aligned}$$

які реалізують максимальну глибину обробітку.

Без засобів автоматизованого опрацювання елементів кортежів (3.29) продуктивне генерування раціональних різновидів поданих ґрунтообробних знарядь вельми проблематичне. У наведеному випадку, згідно з основним правилом комбінаторики, число можливих варіантів здатне сягати

$$N = N_D \cdot N_\alpha \cdot N_\beta \cdot N_\gamma \cdot N_{x_C} \cdot N_{z_C} = 3 \cdot 3 \cdot 6 \cdot 5 \cdot 3 \cdot 3 = 2430.$$

Певним виходом з окресленої ситуації є методологія структурно-параметричного формоутворення. Але, для її успішного застосування необхідні аналітичні вирази, подібні до запропонованих у цьому підрозділі, що описують належну предметну область. Після загальних коментарів перейдемо до безпосередніх ілюстрацій, які виконаємо на прикладі дефініції потрібного профілю борозни. Його геометрія значною мірою визначає характер багатьох експлуатаційних властивостей агротехнічних процесів, тісно пов'язана з обраною конструкцією дискових ґрунтообробних знарядь.

Розглянемо спочатку звичайний сошник, теоретичний профіль борозни якого обчислюється за ординатами й аплікатами залежностей (3.8) і (3.14). При цьому беремо до уваги величину u_S співвідношення (3.12), $u_{\min}$ та $u_{\max}$ формул (3.21). Як наслідок, маємо

$$u \in [19,5^0; \min(u_S; 160,5^0)]. \quad (3.30)$$

Для забезпечення наочності отримуваних графіків перенесемо площину Оху на рівень дна борозни. Тоді аплікати дорівнюватимуть

$$z = -\frac{D}{2} \cos \beta \sin(u) + \frac{D}{2} \cos \beta = \frac{D}{2} \cos \beta (1 - \sin(u)). \quad (3.31)$$

Деякі побудовані профілі, з урахуванням виразів (3.30) і (3.31), з використанням створеної на засадах запропонованого математичного апарату комп'ютерної програми (див. пункт А.2.1 додатків) наведено на рис. 3.13 ... 3.15.

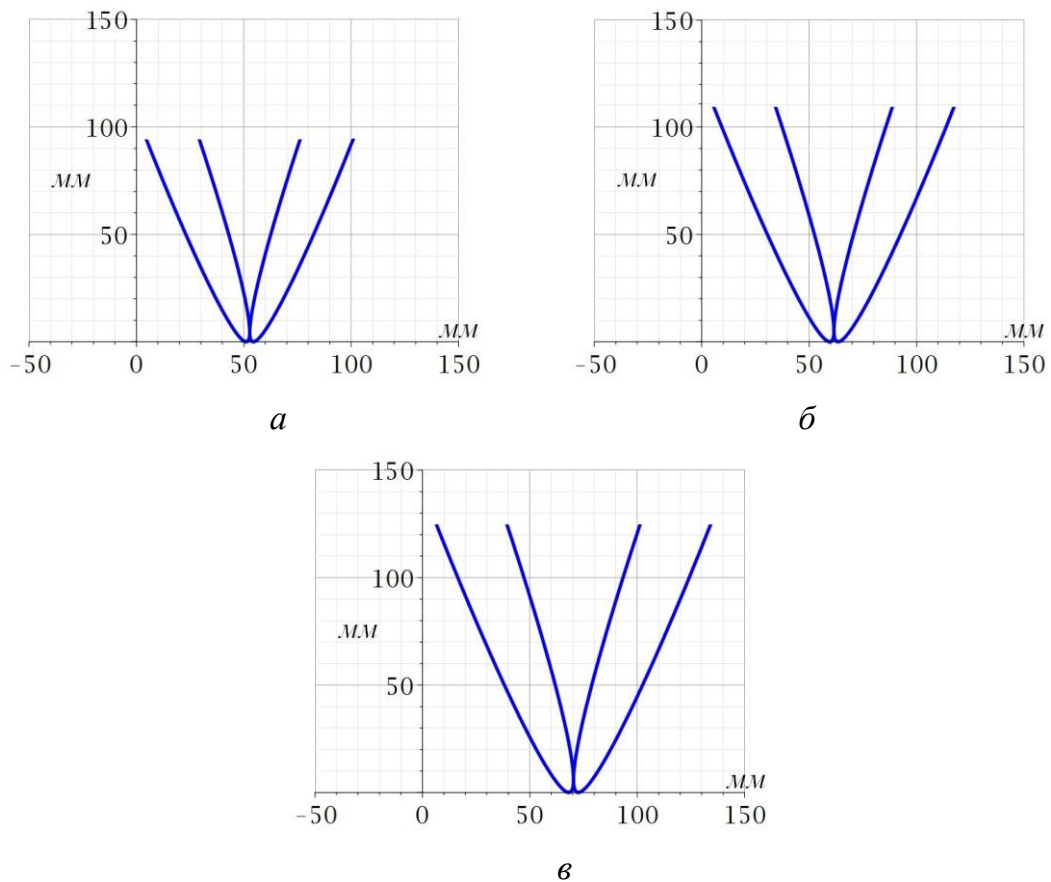


Рис. 3.13. Профілі борозни $\alpha=5^0$, $\beta=20^0$:

$a - D=300$ мм; $б - D=350$ мм; $в - D=400$ мм

Рис. 3.13 ілюструє вплив різних діаметрів D дисків на характер борозни при сталих кутах $\alpha=5^\circ$, $\beta=20^\circ$. Зокрема, це стосується максимальної глибини $a_{\max}$ обробітку та висоти $h_{\text{гр}}$ отриманого гребеня:

$$\begin{aligned} D &= 300 \text{ мм}, a_{\max} = 93,97 \text{ мм}, h_{\text{гр}} = 4,40 \text{ мм}; \\ D &= 350 \text{ мм}, a_{\max} = 109,63 \text{ мм}, h_{\text{гр}} = 5,13 \text{ мм}; \\ D &= 400 \text{ мм}, a_{\max} = 125,29 \text{ мм}, h_{\text{гр}} = 5,86 \text{ мм}. \end{aligned} \quad (3.32)$$

Величини (3.32) підтверджують факт подібності профілів борозни, який впливає з аналізу формул (3.8) та (3.14), з коефіцієнтом, пропорційним діаметру D дисків.

Одна з головних переваг геометричних моделей полягає в їхній наочності. Про це свідчать наведені графіки, з яких видно ширину борозни в нижній її частині та на певних глибинах обробітку. Приблизно можна також оцінити відповідну площу поперечного перерізу. Зазначимо, що її точні розрахунки розглядаються в наступному підрозділі дисертації.

Рис. 3.14 аналогічний попередньому, тільки для кутів $\alpha=8^\circ$, $\beta=25^\circ$.

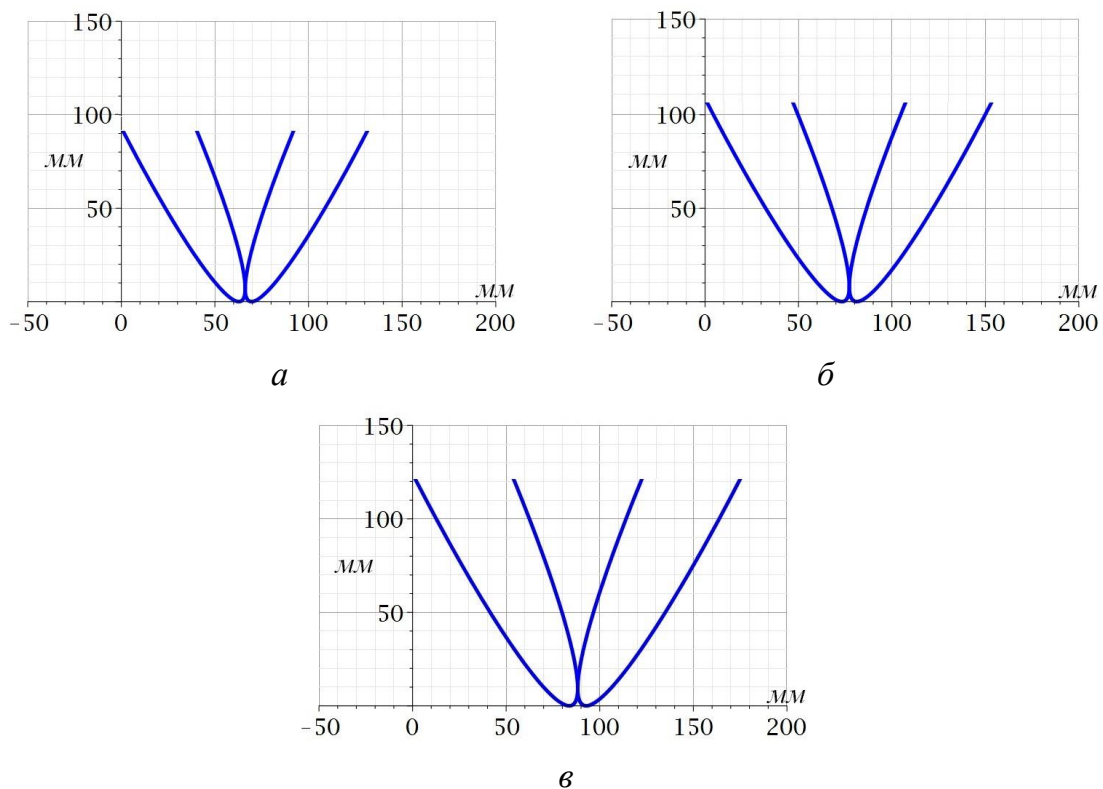


Рис. 3.14. Профілі борозни $\alpha=8^\circ$, $\beta=25^\circ$:

$a - D=300 \text{ мм}$; $б - D=350 \text{ мм}$; $в - D=400 \text{ мм}$

Належні величини мають значення:

$$D = 300 \text{ мм}, a_{\max} = 90,63 \text{ мм}, h_{zp} = 6,95 \text{ мм};$$

$$D = 350 \text{ мм}, a_{\max} = 105,74 \text{ мм}, h_{zp} = 8,10 \text{ мм};$$

$$D = 400 \text{ мм}, a_{\max} = 120,84 \text{ мм}, h_{zp} = 9,26 \text{ мм}.$$

На рис. 3.15 показано ще один різновид борозни.

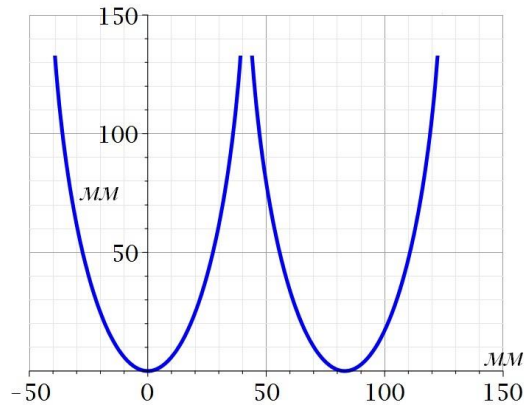


Рис. 3.15. Поперечний переріз борозни $\alpha=12^\circ$, $\beta=0^\circ$, $D=400 \text{ мм}$

Він відповідає випадку вузькорядної сівби. Це свідчить про універсальність опрацьовуваних сошників.

Розглянемо тепер також приклади формування борозни з використанням кута повороту γ (див. рис. 3.16 ... 3.18).

Перший із них відтворює змінювання профілю від діаметра дисків і кута γ . Прогнозовано більшому D відповідає зростання борозни. Також маємо наступні кортежі відповідних висот гребенів

$$(22,78 \text{ мм}; 6,49 \text{ мм}; 1,07 \text{ мм}),$$

$$(30,38 \text{ мм}; 8,65 \text{ мм}; 1,43 \text{ мм}). \quad (3.33)$$

Рис. 3.16 та величини (3.33) показують, що в даних умовах збільшення модуля від'ємного кута γ призводить до потоншення досліджуваного профілю і зменшення висоти гребенів.

Вплив додатних кутів γ на поперечний переріз борозни при тих самих проаналізованих вище значеннях α , β , x_c та z_c ілюструють зображення рис. 3.17.

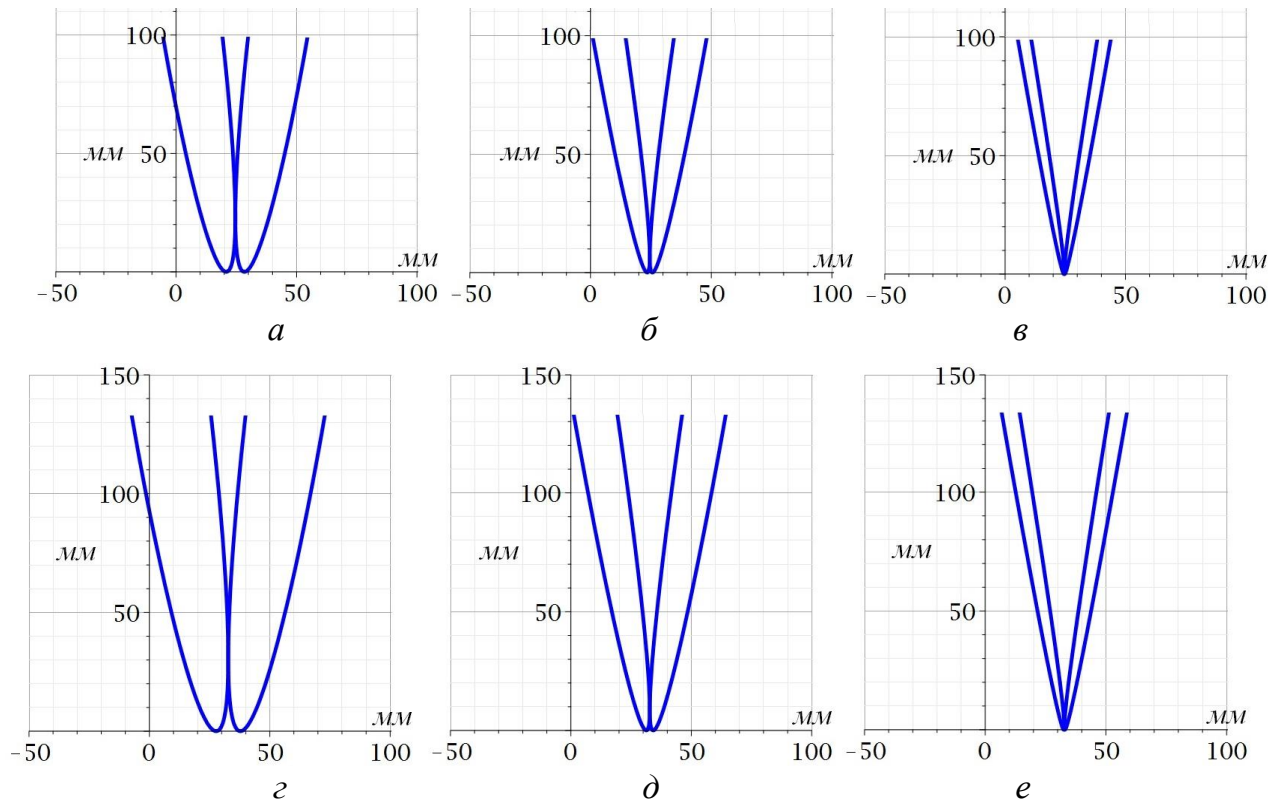


Рис. 3.16. Вплив кута γ на профіль борозни $\alpha=5^\circ$, $\beta=8^\circ$, $x_c=0$ мм, $z_c=110$ мм:

$a, б, в$ – $D=300$ мм: $\gamma=0^\circ$, $\gamma=-15^\circ$, $\gamma=-25^\circ$;

$г, д, е$ – $D=400$ мм: $\gamma=0^\circ$, $\gamma=-15^\circ$, $\gamma=-25^\circ$

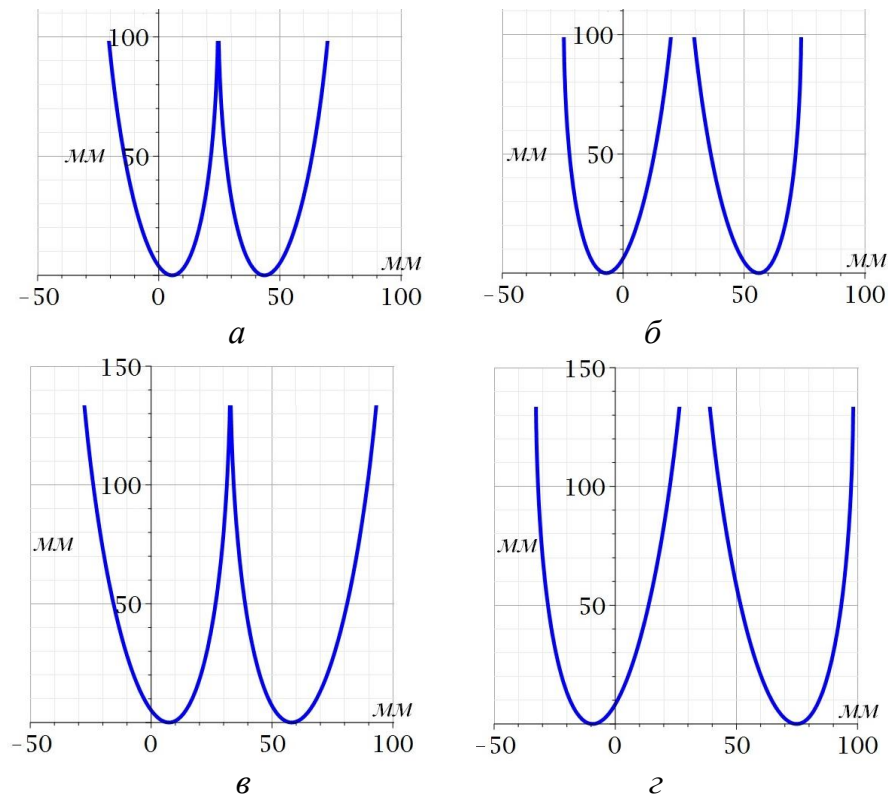


Рис. 3.17. Профілі борозни для $\alpha=5^\circ$, $\beta=8^\circ$, $x_c=0$ мм, $z_c=110$ мм:

$a, б$ – $D=300$ мм: $\gamma=45^\circ$, $\gamma=75^\circ$;

$в, г$ – $D=400$ мм: $\gamma=45^\circ$, $\gamma=75^\circ$

З нього бачимо, що належним вибором діаметрів дисків сошника та кутів γ можна регулювати потрібним чином ширину вузькорядної сівби. У розглянутому прикладі це стосується за поданими графіками візуально приблизно від 40 мм до 85 мм.

За потреби, зокрема, збільшення ширини борозни, наведеної на рис. 3.16 *в* та рис. 3.16 *е*, це може здійснюватися шляхом зростання кута α (рис. 3.18).

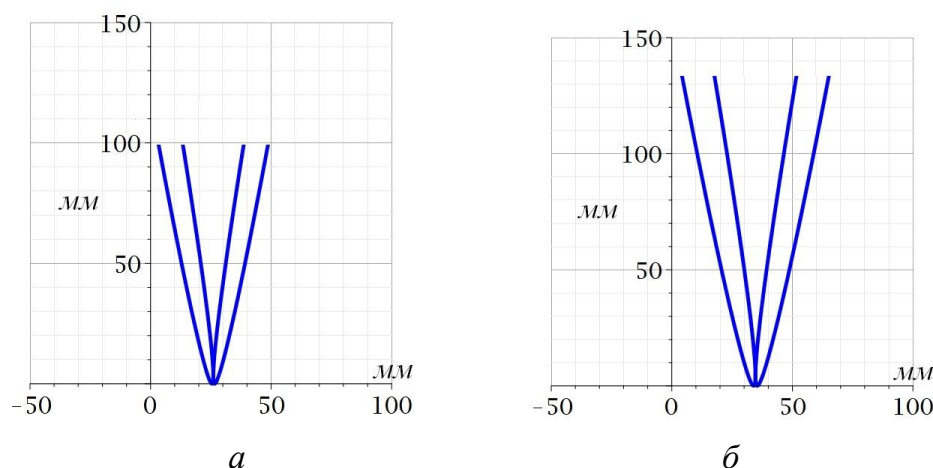


Рис. 3.18. Профілі борозни $\alpha=6^\circ$, $\beta=8^\circ$, $x_c=0$ мм, $z_c=110$ мм, $\gamma=-25^\circ$:

а – $D=300$ мм; *б* – $D=400$ мм

Таким чином, у даному пункті дисертації проаналізовано основні типові профілі борозни дводискового сошника в залежності від діаметрів дисків і кутів їхнього встановлення. Деякі додаткові приклади містить підрозділ А.2.1 додатків.

У наступній частині виконаного наукового дослідження розглядаються питання визначення раціональних величин конструкційно-експлуатаційних геометричних параметрів і характеристик дводискових сошників.

3.3. Оптимізація конструкційно-експлуатаційних геометричних параметрів і характеристик

На нинішньому етапі розвитку суспільства важливою проблемою є забезпечення людей якісними продуктами харчування, збереження навколишнього середовища, економія ресурсів, у тому числі й енергетичних. В окресленому аспекті в підрозділі 2.3 запропоновано загальний метод граничних

оцінок впливу профілю борозни на експлуатаційні енергетичні характеристики ґрунтообробних знарядь. Мета даної частини дисертаційного дослідження полягає в ілюстрації конкретного практичного застосування цього методу на прикладі дводискових сошників.

Нагадаємо, що його головну ідеєю підвищення енергоефективності сільськогосподарських засобів становить широке використання накопиченого досвіду, який обирається в якості відправної точки виконуваної оптимізації. Напрямок бажаних покращень здійснюється з урахуванням аналітично визначених граничних оцінок впливу профілю борозни на енергетичні характеристики ґрунтообробних знарядь. У підрозділі 2.3 було показано, що одним із дієвих шляхів є зменшення сили опору. Тоді, при незмінних інших експлуатаційних параметрах, знижуються енергетичні витрати у вигляді зменшення потрібної потужності тракторів.

Відомо, що опір ґрунтообробного знаряддя пропорційний площі A поперечного перерізу утворюваної ним борозни. Отже, варіювання вказаної величини, при сталих значеннях решти параметрів, дозволяє оцінити відповідне змінювання сили опору.

На основі викладеного в пункті 3.2.1 математичного апарату й рис. 3.12 виконаємо аналітичну дефініцію площі A профілю борозни сошника з дисками діаметром D , кутами їхнього встановлення α та β , глибиною обробітку a . Перемістимо початкову систему координат $Oxuz$ вертикально вниз так, щоб площина Oxu співпадала з рівнем дна борозни. Тоді аплікати у співвідношеннях (3.8) і (3.14) будуть

$$z = z(u) = \frac{D}{2} \cos \beta (1 - \sin(u)). \quad (3.34)$$

На підставі інтеграла для обчислення площі криволінійної трапеції, обмеженої параметричною кривою, та симетричності профілю борозни відносно вертикальної осі, яка проходить через точку S сходження дисків або середину відповідного відрізка при застосуванні ненульової величини зазору d_s між ними, маємо:

– при $u_s < 180^\circ - u_\theta$

$$A = 2 \cdot \left((y_s - y_\theta) \cdot a - \int_{u_\theta}^{u_s} z(u) y'(u) du + \frac{d_s}{2} \cdot (a - z_s) \right), \quad (3.35)$$

– при $u_s \geq 180^\circ - u_\theta$

$$A = 2 \cdot \left((y_s - y_\theta) \cdot a - \int_{u_\theta}^{180^\circ - u_\theta} z(u) y'(u) du \right), \quad (3.36)$$

де $y(u)$ – ордината першого (лівого) диска;

$z(u)$ – за формулою (3.34), згідно з нею також $z_s = z(u_s)$ – висота гребеня борозни.

Складові y_s та y_θ залежностей (3.35) і (3.36) мають вигляд:

$$\begin{aligned} y_s &= y(u_s) = \frac{D}{2} (\cos \alpha \sin \beta \sin(u_s) - \sin \alpha \cos(u_s)), \\ y_\theta &= y(u_\theta) = \frac{D}{2} (\cos \alpha \sin \beta \sin(u_\theta) - \sin \alpha \cos(u_\theta)), \end{aligned} \quad (3.37)$$

де $u_s = \arctg(-\operatorname{ctg} \alpha \cdot \sin \beta) + 180^\circ$,

$u_\theta = \arcsin(1 - 2a/(D \cdot \cos \beta))$.

Обчислюємо похідну

$$y'(u) = \frac{D}{2} (\cos \alpha \sin \beta \cos(u) + \sin \alpha \sin(u)) \quad (3.38)$$

та інтеграл

$$\begin{aligned} \int_{u_\theta}^{u_{s\theta}} z(u) y'(u) du &= \int_{u_\theta}^{u_{s\theta}} \frac{D}{2} \cos \beta (1 - \sin(u)) \cdot \frac{D}{2} (\cos \alpha \sin \beta \cos(u) + \sin \alpha \sin(u)) du = \\ &= \frac{D^2}{4} \cos \beta \cdot (\cos \alpha \sin \beta \int_{u_\theta}^{u_{s\theta}} \cos(u) du + \sin \alpha \int_{u_\theta}^{u_{s\theta}} \sin(u) du - \\ &\quad - \cos \alpha \sin \beta \int_{u_\theta}^{u_{s\theta}} \sin(u) \cos(u) du - \sin \alpha \int_{u_\theta}^{u_{s\theta}} \sin^2(u) du) = \\ &= \frac{D^2}{4} \cos \beta \cdot (\cos \alpha \sin \beta \sin(u) \Big|_{u_\theta}^{u_{s\theta}} - \sin \alpha \cos(u) \Big|_{u_\theta}^{u_{s\theta}} - \\ &\quad - \frac{\cos \alpha \sin \beta \sin^2(u)}{2} \Big|_{u_\theta}^{u_{s\theta}} - \sin \alpha \cdot \frac{2u - \sin(2u)}{4} \Big|_{u_\theta}^{u_{s\theta}}), \end{aligned} \quad (3.39)$$

де $u_{s\theta} = u_s$ для $u_s < 180^\circ - u_\theta$ та $u_{s\theta} = 180^\circ - u_\theta$ для $u_s \geq 180^\circ - u_\theta$.

З використанням формул (3.34) ... (3.39) розроблено приведену в пункті А.2.1 комп'ютерну програму системи математичного моделювання Maple для обчислення площі поперечного перерізу борозни. Проілюструємо деякі отримані результати на прикладі сошника з дисками діаметром $D=350$ мм, кутами $\alpha=5^\circ$ і $\beta=20^\circ$, профіль борозни якого показано на рис. 3.13 б. Застосовуватимемо нульову мінімальну відстань між дисками та опрацюватимемо проміжок глибин обробітку ґрунту

$$a \in [20 \text{ мм}, 80 \text{ мм}]. \quad (3.40)$$

Належний профіль ілюструє рис. 3.19. На другому збільшеному зображенні показано гребінь, який утворюється в нижній частині борозни. Його ширина на висоті більшій одного міліметра в основному становить менше міліметра. Іншими словами, на практиці форма даного гребеня описуватиметься приблизно рівнобічною трапецією з висотою від 1 до 1,5 мм, нижньою й верхньою основою 3 мм та 1 мм. Ці геометричні параметри є допустимими. Далі вказаний момент у цьому підрозділі більш акцентувати не будемо.

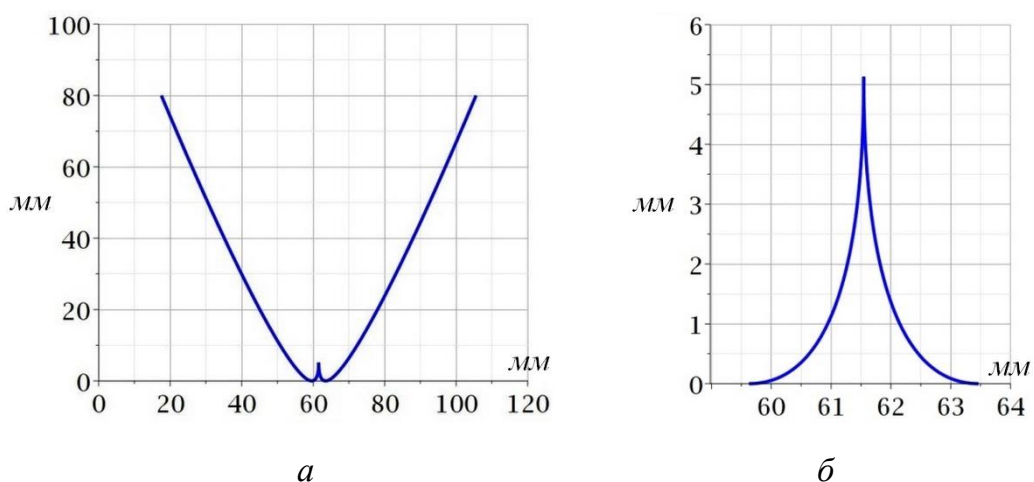


Рис. 3.19. Профілі борозни $D=350$ мм, $\alpha=5^\circ$, $\beta=20^\circ$:

a – загальний вигляд; $б$ – гребінь

Табл. 3.1 містить результати обчислень на базі виразів (3.34) ... (3.39) за допомогою зазначеної вище комп'ютерної програми площі A профілю борозни для $D=350$ мм, $\alpha=5^\circ$, $\beta=20^\circ$ у залежності від глибини a обробітку ґрунту.

Змінювання площі A профілю борозни для $D=350$ мм, $\alpha=5^\circ$, $\beta=20^\circ$ Таблиця 3.1

Глибина a обробітку ґрунту, мм	20	30	40	50	60	70	80
Площа A профілю борозни, мм ²	415	796	1277	1851	2516	3268	4106

Для квадратичної апроксимації маємо

$$A(a) = k_2 a^2 + k_1 a + k_0, \quad (3.41)$$

де $k_2=91/200$, $k_1=1129/70$, $k_0=-1305/14$.

Її графік показано на рис. 3.20.

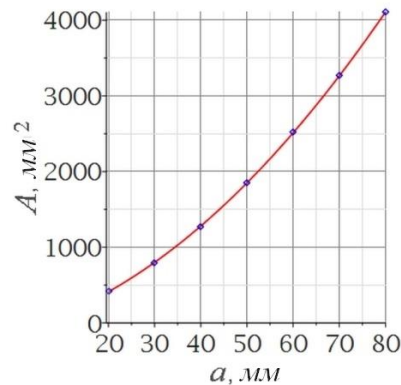


Рис. 3.20. Візуалізація даних табл. 3.1 та залежності (3.41)

Проаналізуємо приклад оптимізації, коли застосовується поточна глибина $a_0=50$ мм обробітку ґрунту й виникає питання щодо доцільності використання нової $a_1=45$ мм або $a_2=55$ мм. Для дефініції раціонального варіанта варто діяти наступним чином. Очевидно, що глибина a_1 зменшує енергетичні витрати, але здатна призвести до погіршення сільськогосподарських показників. У випадку a_2 все навпаки. Дослідження агротехнічних факторів, на відміну від енергетичних, не входить до задач цієї дисертації. На засадах запропонованого підходу визначити межі можливого змінювання енергетичних витрат (EB) опрацьовуваних N_{EB} проєктних варіантів дозволяє множина граничних оцінок

$$EB = (EB_i)_{i=1}^{N_{EB}}, \quad (3.42)$$

де

$$EB_i = \left(\frac{A_i - A_0}{A_0} \right) \cdot 100\%, \quad (3.43)$$

A_0 та A_i – площа поперечного перерізу борозни вихідного й i -го варіанта.

Вирази (3.42) та (3.43) достатньо загальні, оскільки не обмежують число різновидів, що аналізуються, мають формат відносних показників у відсотках, здатні застосовувати площі поперечних перерізів, які залежать від різноманітних параметрів. Зменшенню площ відповідає знак мінус, тобто зниження енергетичних витрат, інакше маємо їхнє збільшення.

Термін *граничні оцінки* вжито через те, що в розрахунках береться до уваги пряма пропорційна залежність між площею поперечного перерізу борозни та силою опору ґрунтообробного знаряддя. Чисельні ж практичні експерименти показують, що зазначена сила зростає дещо швидше, ніж збільшується площа, та спадає скоріш, ніж зменшується остання. Тобто, вказана пряма пропорційна залежність дозволяє мати тільки відповідні граничні оцінки. Так, зокрема, якщо площа борозни збільшиться на 10%, то енергетичні витрати зростуть теж не менш ніж на 10%. З іншого боку, коли ця ж площа зменшиться на 10%, то енергетичні витрати спадуть не менш ніж на 10%. У цьому полягає сутність терміна граничних оцінок.

Проілюструємо вище сказане спочатку на прикладі співвідношення (3.41). Тоді маємо

$$A_0 = A(a_0) = 1851 \text{ мм}^2, A_1 = A(a_1) = 1554 \text{ мм}^2, A_2 = A(a_2) = 2170 \text{ мм}^2. \quad (3.44)$$

Далі, з використанням величин (3.44), обчислюємо

$$EB_1 = \left(\frac{A_1 - A_0}{A_0} \right) \cdot 100\% = \left(\frac{1554 \text{ мм}^2 - 1851 \text{ мм}^2}{1851 \text{ мм}^2} \right) \cdot 100\% \approx -16\%, \quad (3.45)$$

$$EB_2 = \left(\frac{A_2 - A_0}{A_0} \right) \cdot 100\% = \left(\frac{2170 \text{ мм}^2 - 1851 \text{ мм}^2}{1851 \text{ мм}^2} \right) \cdot 100\% \approx 17\%. \quad (3.46)$$

Отже, якщо економія ресурсів (3.45) у фінансовому еквіваленті перекидає можливі збитки від погіршення аграрних показників, то глибина $a_1=45$ мм доцільна, інакше – ні. За аналогією, якщо додаткові витрати (3.46) менші, ніж отримувані прибутки від покращення сільськогосподарської діяльності, то нова глибина $a_2=55$ мм доречна, у протилежному випадку – ні. Надалі фінансова ефективність пропонованих змінювань профілю борозни оцінюється подібним чином і тому більш не коментується.

Наведений підхід також дозволяє оцінити вплив діаметрів D дисків на енергетичні показники сошника. Нехай потрібно опрацювати дані, які подано в табл. 3.2.

Змінювання площі A профілю борозни для $a=50$ мм, $\alpha=5^\circ$, $\beta=20^\circ$ Таблиця 3.2

Діаметр дисків, мм	300	320	350	380	400
Площа A профілю борозни, мм ²	1762	1798	1851	1902	1935

Потрібний вираз квадратичної апроксимації має вигляд

$$A(D) = k_2 D^2 + k_1 D + k_0, \quad (3.47)$$

де $k_2=0,000981$; $k_1=2,41766$; $k_0=1124.9387$.

Відповідний графік зображено на рис. 3.21.

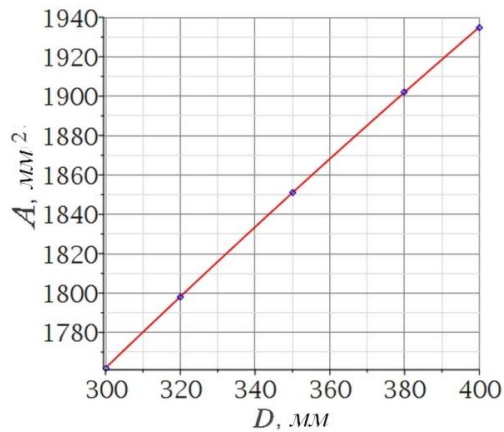


Рис. 3.21. Візуалізація даних табл. 3.2 та залежності (3.47)

На рис. 3.22 показано змінювання гребеня борозни для двох діаметрів D дисків.

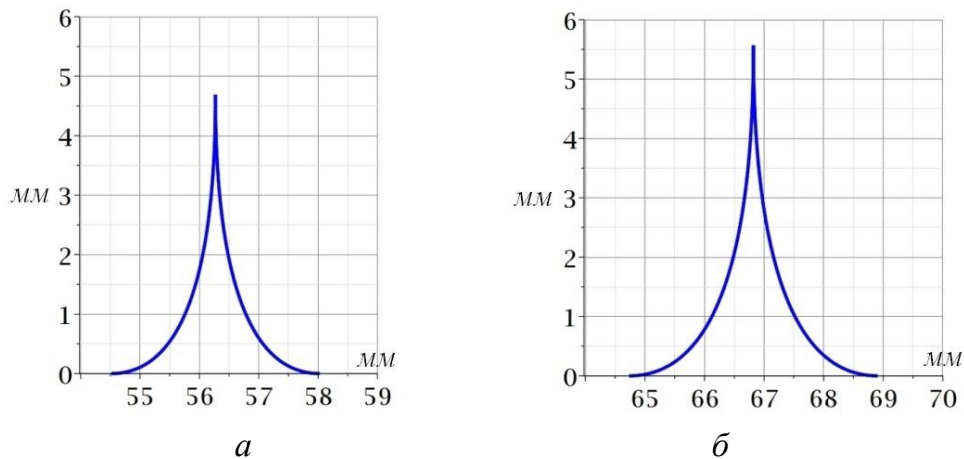


Рис. 3.22. Гребені борозни для $a=50$ мм, $\alpha=5^\circ$, $\beta=20^\circ$:

$a - D=320$ мм; $б - D=380$ мм

Припустимо, що з точки зору агротехнічних вимог гребінь рис. 3.22 *б* завеликий, а варіант борозни рис. 3.22 *а* прийнятний. В останньому випадку, з використанням формул (3.43) та (3.47), економія ресурсів буде становити

$$EB = \left(\frac{A(D = 320 \text{ мм}) - A(D = 350 \text{ мм})}{A(D = 350 \text{ мм})} \right) \cdot 100\% =$$

$$= \left(\frac{1798 \text{ мм}^2 - 1851 \text{ мм}^2}{1851 \text{ мм}^2} \right) \cdot 100\% \approx -2,9\%. \quad (3.48)$$

Співвідношення (3.47) дозволяє опрацьовувати довільні діаметри дисків із проміжку

$$D \in [300 \text{ мм}, 400 \text{ мм}]. \quad (3.49)$$

Порівнюючи значення (3.45) і (3.48), робимо висновок про суттєво більший вплив на енергозбереження глибини a обробітку ґрунту, ніж діаметрів D дисків. Можлива також інтегрована дія розглянутих експлуатаційно-конструкційних параметрів. Наприклад, для $a=45 \text{ мм}$, $\alpha=5^\circ$, $\beta=20^\circ$, $D=320 \text{ мм}$ маємо

$$EB = \left(\frac{A(a=45 \text{ мм}, \alpha=5^\circ, \beta=20^\circ, D=320 \text{ мм})}{A(a=50 \text{ мм}, \alpha=5^\circ, \beta=20^\circ, D=350 \text{ мм})} - 1 \right) \cdot 100\% =$$

$$= \left(\frac{1507 \text{ мм}^2}{1851 \text{ мм}^2} - 1 \right) \cdot 100\% \approx -18,6\%. \quad (3.50)$$

Зауважимо, що конкретні застосовані величини виразу (3.50) отримано за допомогою другої комп'ютерної програми додатків А.2.1, а підсумком є відносна гранична оцінка зменшення енерговитрат. Належні профілі борозни показано на рис. 3.23.

Унаочнити залежності (3.35) ... (3.39), наприклад для $\alpha=5^\circ$, $\beta=20^\circ$ і проміжків (3.40) та (3.49), можна за допомогою вказаної вище програми, результати розрахунків якої містить табл. 3.3. У ній синім кольором виділено раніш опрацьовані значення з використанням виразів (3.41) і (3.47).

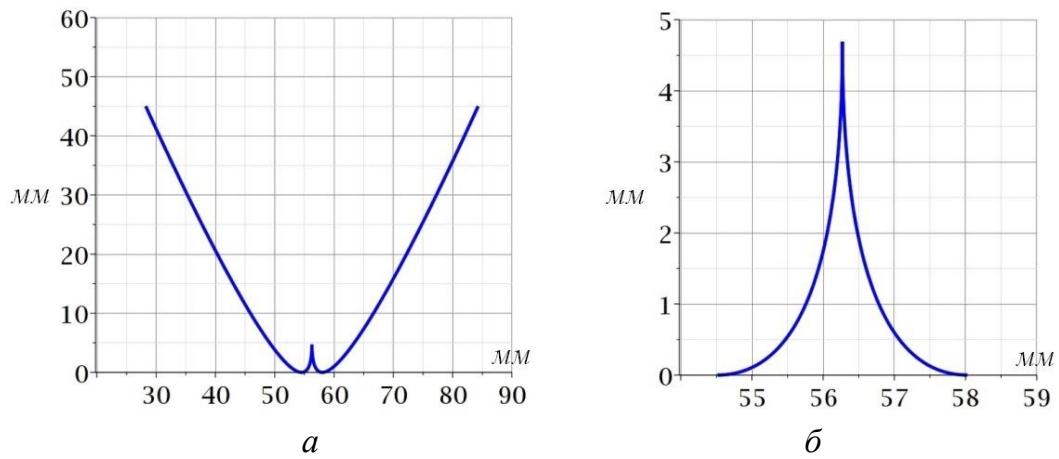


Рис. 3.23. Профілі борозни $D=320$ мм, $\alpha=5^\circ$, $\beta=20^\circ$, $a=45$ мм:

a – загальний вигляд; $б$ – гребінь

Площа A профілю борозни, мм²

Таблиця 3.3

Глибина a обробітку грунту, мм	Діаметр дисків, мм				
	$D=300$ мм	$D=320$ мм	$D=350$ мм	$D=380$ мм	$D=400$ мм
20	390	400	415	430	440
30	753	771	796	822	838
40	1212	1238	1277	13140	1338
50	1762	17980	1851	1902	1935
60	2401	2448	2516	2591	2624
70	3126	3184	3268	3350	3402
80	3933	4004	4106	4205	4269

Рис. 3.24 унаочнює одержану інформацію.

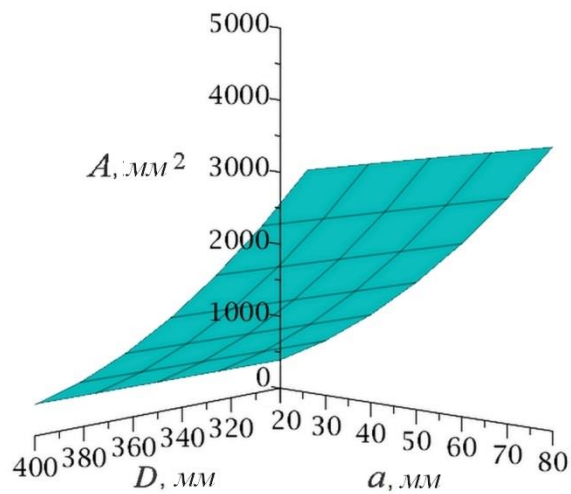


Рис. 3.24. Залежність площі A профілю борозни для $\alpha=5^\circ$, $\beta=20^\circ$

Відповідні формули мають вигляд:

$$A(D, a) = k_2(D) \cdot a^2 + k_1(D) \cdot a + k_0(D), \quad (3.51)$$

де $k_2(D) = -13/2046240000 \cdot D^2 + 16361/70992000 \cdot D + 7254577/19325600$,

$k_1(D) = -6803/204624000 \cdot D^2 + 96181/1987776 \cdot D + 6261669/1932560$,

$k_0(D) = 281/426300 \cdot D^2 - 231883/414120 \cdot D + 2184507/96628$.

На рис. 3.25 показано, для прикладу, вплив змінювання кутів α та β встановлення дисків на отримувану борозну.

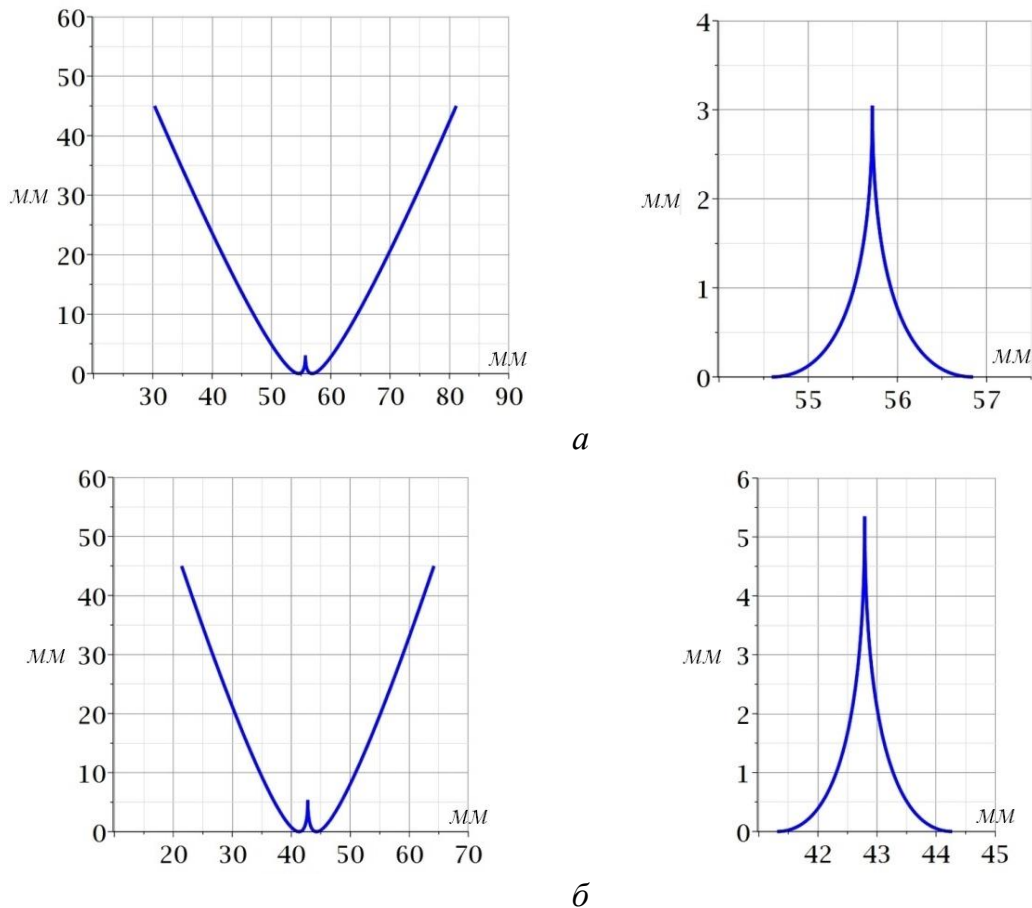


Рис. 3.25. Профілі та гребені борозни $D=320$ мм, $a=45$ мм:

$a - \alpha=4^\circ, \beta=20^\circ$; $б - \alpha=4^\circ, \beta=15^\circ$

У першому та другому випадку площа профілю борозни відповідно

$$A_1 = 1330 \text{ мм}^2, A_2 = 1160 \text{ мм}^2. \quad (3.52)$$

Як свідчать величини (3.52), зменшення кутів α та β суттєво впливає на спадання площі поперечного перерізу борозни. Однак, при цьому обов'язково потрібно враховувати, крім агротехнічних показників, також можливість конструкційної реалізації проаналізованих геометричних параметрів. Отже, порівняно з початковим станом зменшення енергетичних витрат становить

$$EB_1 = \left(\frac{A(a=45 \text{ мм}, \alpha=4^0, \beta=20^0, D=320 \text{ мм})}{A(a=50 \text{ мм}, \alpha=5^0, \beta=20^0, D=350 \text{ мм})} - 1 \right) \cdot 100\% =$$

$$= \left(\frac{1330 \text{ мм}^2}{1851 \text{ мм}^2} - 1 \right) \cdot 100\% \approx -28\%. \quad (3.53)$$

$$EB_2 = \left(\frac{A(a=45 \text{ мм}, \alpha=4^0, \beta=15^0, D=320 \text{ мм})}{A(a=50 \text{ мм}, \alpha=5^0, \beta=20^0, D=350 \text{ мм})} - 1 \right) \cdot 100\% =$$

$$= \left(\frac{1160 \text{ мм}^2}{1851 \text{ мм}^2} - 1 \right) \cdot 100\% \approx -37\%. \quad (3.54)$$

Вирази (3.53) і (3.54) показують, що для різних вирощуваних сільськогосподарських культур розглянуті витрати варіюються в широких межах. Проте, питання забезпечення гнучкої адаптації сошників до конкретних умов їхньої експлуатації не є однозначним. Мається на увазі, що вказані дії повинні реалізовувати позитивні узагальнені наслідки, а не призводити тільки до збільшення витрат на налаштування сошників. Зауважимо також, що описані вище прийоми дозволяють обчислити для кутів α та β залежності вигляду (3.51) їхнього впливу на величину площі A профілю борозни і, відповідно, на енергозбереження.

Отже, запропонована в даному підрозділі методика синтезу варіантів та їх оптимізації на прикладі конструкційно-експлуатаційних геометричних параметрів і характеристик дводискових сошників дозволяє, шляхом здійснення відповідного аналізу, визначати для наявних умов найбільш раціональну конфігурацію застосовуваних ґрунтообробних знарядь. Це стосується підвищення їхньої енергоефективності без значного зниження отримуваних аграрних показників. Окреслені здобутки становлять основну наукову і практичну цінність поданого підходу. Однак, наведені відомості потребують свого певного належного теоретичного узагальнення та систематизації, поширення на решту існуючих різноманітних сільськогосподарських ґрунтообробних знарядь. Останнє визначає напрямки проведення подальших наукових розвідок за вказаною тематикою.

Висновки до розділу 3

Матеріали цієї частини дослідження, спираючись на викладені в попередньому розділі теоретичні основи, проілюстрували працездатність запропонованого підходу на прикладі математичного та комп'ютерного моделювання геометричних конструкційно-експлуатаційних параметрів і характеристик дводискових сошників та проведенні їхньої оптимізації.

Подані відомості опубліковано у працях [22, 31, 150, 171], виконаних за участю автора дисертації.

Отримано наступні нові наукові та практичні результати.

1. Запропоновано концептуальну конструкцію універсальних дводискових сошників, які пристосовані для реалізації як звичайної, так і вузькорядної сівби. Це забезпечено визначенням раціональних кутів встановлення дисків відносно трьох ортогональних осей, дві з них належать площині симетрії знаряддя, а третя може мати довільне розташування у просторі. Наведені особливості сприяють гнучкій адаптації даного механічного виробу до різноманітних умов його експлуатації.

2. Створено аналітичний апарат дефініції профілю борозни дводискового сошника для таких його конструкційно-експлуатаційних параметрів, як діаметри дисків, кути їхнього позиціонування та глибина обробітку ґрунту. Це дозволяє прогнозовано визначати їхні раціональні величини під час проєктування.

3. На прикладі дводискових сошників проілюстровано практичне використання запропонованого у другому розділі дисертації методу граничних оцінок впливу профілю борозни на експлуатаційні енергетичні характеристики знарядь для механічного обробітку ґрунту, що забезпечено належну оптимізацію останніх та підтвердило дієвість зазначеного підходу.

4. Удосконалено теорію автоматизованого варіантного проєктування виробів машинобудування напрацьованими інтегрованими конструкційно-експлуатаційними геометричними моделями дводискових сошників.

5. Отримала подальший розвиток методологія структурно-параметричного формоутворення технічних об'єктів шляхом розширення застосування принципу інтеграції на визначення конструкційно-експлуатаційних геометричних параметрів та характеристик дводискових сошників.

Отже, розглянуті у третьому розділі дисертації матеріали належним чином поєднують і доповнюють відомості попередніх частин виконаного наукового дослідження стосовно поставленої в ньому мети та завдань, запропонованих нових теоретичних положень, методів і прийомів моделювання ґрунтообробних знарядь під час їхнього автоматизованого проєктування.

РОЗДІЛ 4

ФОРМОУТВОРЕННЯ ДИСКОВИХ ПІДГОРТАЧІВ

Дану частину дисертації присвячено моделюванню конструкційно-експлуатаційних геометричних параметрів і характеристик дискових підгортачів. Після викладеного в попередньому розділі варіантного комп'ютерного формоутворення дводискових сошників це обумовлено бажанням, з одного боку, розкрити достатньо загальний характер запропонованого підходу, а з іншого, ширше охопити життєвий цикл сільського господарства. Мається на увазі не тільки посів певних рослин за допомогою сошників, а й догляд за ними з використанням таких ґрунтообробних знарядь, як підгортачі. Поданий матеріал розміщено у трьох підрозділах, присвячених відповідно: елементам концептуальної конструкційної схеми підгортачів; розробленому математичному апарату побудови профілів борозни; аналізу отриманих практичних результатів.

4.1. Елементи концептуальної конструкційної схеми

У підрозділі 2.1 викладено побудову СПГМ для варіантного формоутворення дискових підгортачів на стадії ескізного проектування. При цьому було показано, що основними компонентами, які впливають на необхідну борозну та, як наслідок, потрібний об'єм ґрунту, що підгортається, є стояки й диски. Головна роль перших полягає в тому, що вони визначають глибину a обробітку та являють собою (див. рис. 2.4) осі обертання для позиціонування дисків під бажаним кутом α в горизонтальній площині до напрямку поступального руху сільськогосподарського знаряддя.

Розглядатимемо сферичні диски з радіусами R відповідної поверхні та діаметрами D . Належну схему наведено на рис. 4.1. Зазначимо, що на ній зображено тільки лівий (перший) диск. Другий розташовується симетрично відносно вертикальної площини, яка проходить уздовж середини опрацьованого рядка ґрунту. Також акцентуємо, що встановлені в даному розділі математичні співвідношення є необхідними складовими вказаних вище СПГМ.

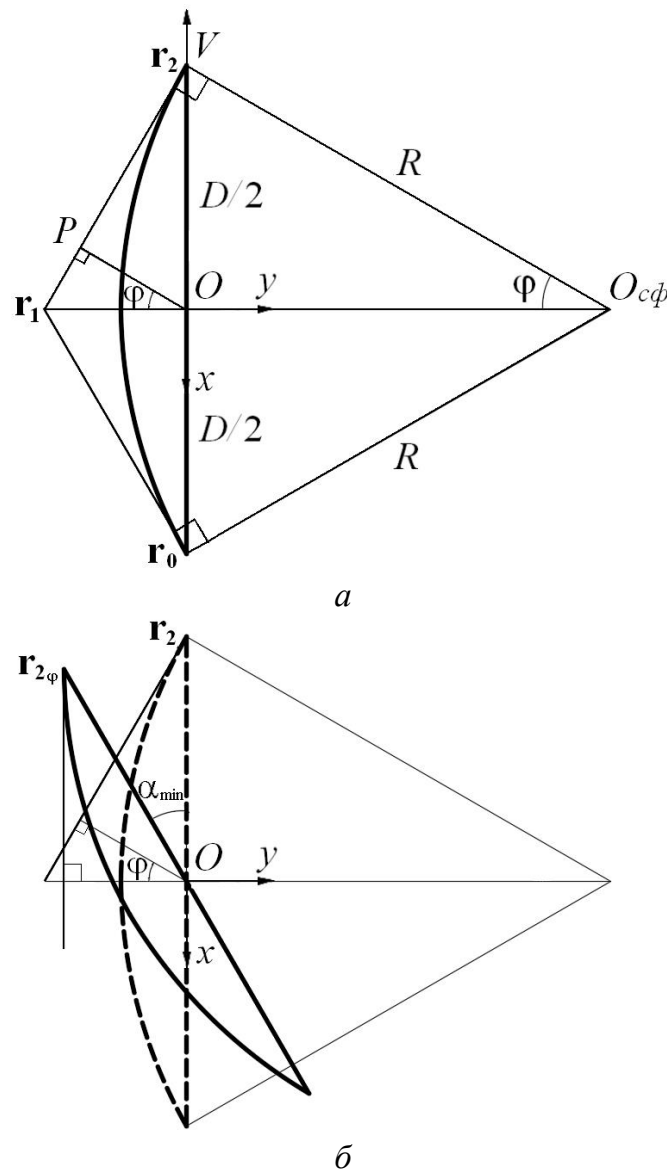


Рис. 4.1. Схема визначення мінімального кута $\alpha_{\min}$ встановлення диска (вид зверху за напрямом швидкості V руху підгортача):

$$a - \alpha = 0^\circ; \quad b - \alpha = \alpha_{\min} = \varphi$$

Рис. 4.1 *a* ілюструє розріз теоретичної поверхні диска горизонтальною площиною, яка містить центр O_{cf} його сфери. Дуга кола з радіусом R проходить через дві свої кінцеві точки r_0 та r_2 , дотичні в яких перетинаються в точці r_1 , що розташована на осі симетрії вказаної дуги. Застосовувана прямокутна система координат $Oxyz$ має початок у центрі O основи з діаметром D сферичного сегмента, вісь x протилежна швидкості V руху знаряддя, y – знаходиться в горизонтальній площині, а z – вертикальна. З наведених побудов видно, що відрізки $O_{cf}r_2$ та OP паралельні, як перпендикуляри до відрізка r_1r_2 . Звідси кути їхнього нахилу до прямої $O_{cf}r_1$ однакові й дорівнюють φ . Мінімальний кут $\alpha_{\min}$

(див. рис. 4.1 б), де початкове положення диска показано штриховою лінією, відповідає його повороту навколо осі z на величину φ проти годинникової стрілки. При цьому дотична в точці $\mathbf{r}_2$ (остання при вказаному повороті перетворюється в точку $\mathbf{r}_{2\varphi}$) стає перпендикулярною до осі y . Зазначеним забезпечується те, що за вказаних умов диск перестає взаємодіяти своєю задньою (для напрямку V експлуатаційного руху) поверхнею з ґрунтом. Тобто виключається даний небажаний фактор.

Величина φ (див. рис. 4.1 а) обчислюється з виразу

$$R \cdot \sin(\varphi) = D/2,$$

звідки

$$\varphi = \arcsin\left(\frac{D}{2R}\right) = \alpha_{\min}. \quad (4.1)$$

Отже, кут відхилення лівого (першого) диска в горизонтальній площині від напрямку руху підгортача

$$\alpha \in [\alpha_{\min}, \alpha_{\max}] = [\varphi, 90^0], \quad (4.2)$$

де φ розраховується за формулою (4.1).

Таким чином, нами доведено

Твердження 4.1. Для виключення негативного впливу на механічний обробіток ґрунту підгортачем з дисками діаметром D та радіусом R сферичної поверхні мінімальний кут лівого (першого) диска в горизонтальній площині по відношенню до напрямку руху знаряддя повинен становити від $\arcsin(0,5 \cdot D/R)$ до 90 градусів.

Розглянуту робочу теоретичну поверхню диска можна описати на засадах викладеного в підрозділі 2.2 узагальненого підходу за допомогою NURBS з використанням раціональних параметричних кривих другого степеня. Тоді для твірної формату (2.18), базуючись на рис. 4.1 а, маємо наступні її вершини

$$\mathbf{r}_0 = \left(\frac{D}{2}, 0, 0\right), \quad \mathbf{r}_1 = \left(0, -R \cdot \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2}, 0\right), \quad \mathbf{r}_2 = \left(-\frac{D}{2}, 0, 0\right) \quad (4.3)$$

та ваговий коефіцієнт

$$w_1 = \cos \varphi. \quad (4.4)$$

Рівняння поверхні обертання з віссю y і твірною, яка знаходиться у площині Oxy , мають вигляд

$$x = x(u) \cos(v); \quad y = y(u); \quad z = x(u) \sin(v), \quad (4.5)$$

де $v \in [0, \pi]$ – параметр кута повороту в радіанах.

Проаналізуємо характер змінювання кута $\alpha_{\min} = \varphi$ проміжку (4.2) залежно від наявних значень D та R . Нехай, для прикладу, потрібний діапазон радіусів сферичної поверхні становить

$$R \in [R_{\min}, R_{\max}] = [200 \text{ мм}, 1000 \text{ мм}]. \quad (4.6)$$

Тоді, на основі співвідношення

$$D_{\max} = 2 \cdot R, \quad (4.7)$$

де $D_{\max}$ – це найбільший діаметр для певного R , можливі діаметри

$$D \in (0 \text{ мм}, D_{\max}]. \quad (4.8)$$

Досліджуватимемо їх, зокрема, починаючи з

$$D_{\min} = 200 \text{ мм}. \quad (4.9)$$

На підставі формул (4.7) ... (4.9) для опрацьовуваних діаметрів дисків остаточно маємо

$$D \in [D_{\min}, D_{\max}]. \quad (4.10)$$

Зауважимо, що при дефініції величини (4.9) необхідно брати до уваги те, що вона повинна реалізовуватися хоч би одним елементом множини (4.6). Також великі значення проміжку (4.10) у даному випадку мають не практичний, а теоретичний інтерес.

Залежність (4.1) для виразів (4.6) ... (4.10) відтворюють графіки рис. 4.2 та рис. 4.3. З першого видно, що найбільше $\alpha_{\min}$ в 90° досягається за умови (4.7), а найменше для певного D спадає зі зростанням R . Збільшення D призводить до відповідного змінювання й кута $\alpha_{\min}$. Це цілком узгоджується зі схемою рис. 4.1. Перевага наведених графіків полягає в їхній наочності, що дозволяє продуктивно приймати ефективні рішення під час проектування.

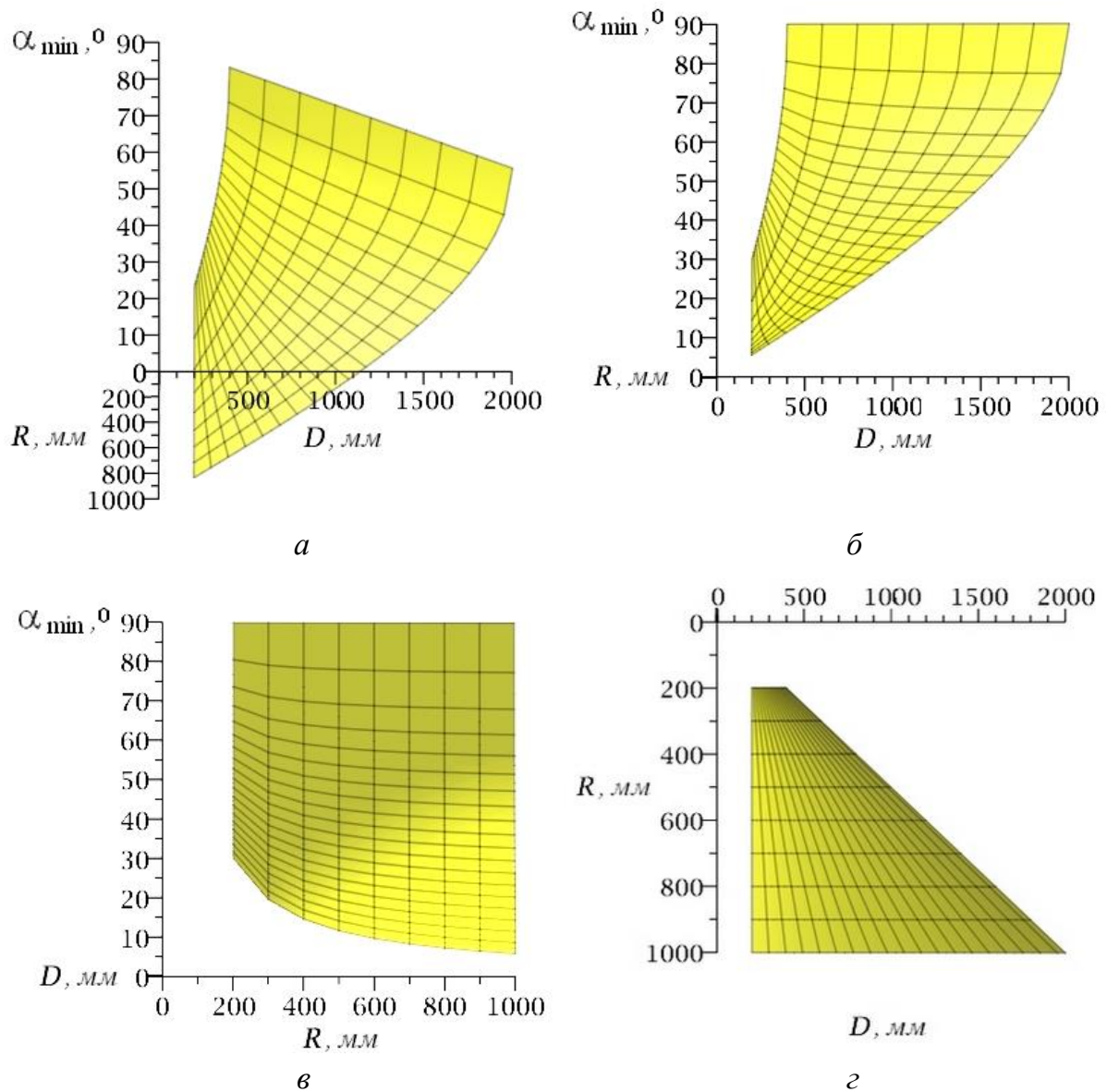


Рис. 4.2. Змінювання кута $\alpha_{\min}$ для $R \in [200 \text{ мм}, 1000 \text{ мм}]$, $D \in [200 \text{ мм}, 2000 \text{ мм}]$:

a, б, в, г – види з різних ракурсів

Рис. 4.3 ілюструє найбільш розповсюджені на практиці діапазони радіусів R сферичних поверхонь і діаметрів D дисків підгортачів. За наведеними зображеннями зручно визначати орієнтовні величини кутів $\alpha_{\min}$, які відповідають указаним параметрам. Точні результати отримують виконанням належних обчислень.

Далі, спираючись на рис. 2.4 підрозділу 2.1 дисертації, де представлено базові компоненти конструкції опрацьовуваного підгортача, проаналізуємо його кінематичну схему, що реалізує поворот диска діаметром D на потрібний кут α в горизонтальній площині (див. рис. 4.4).

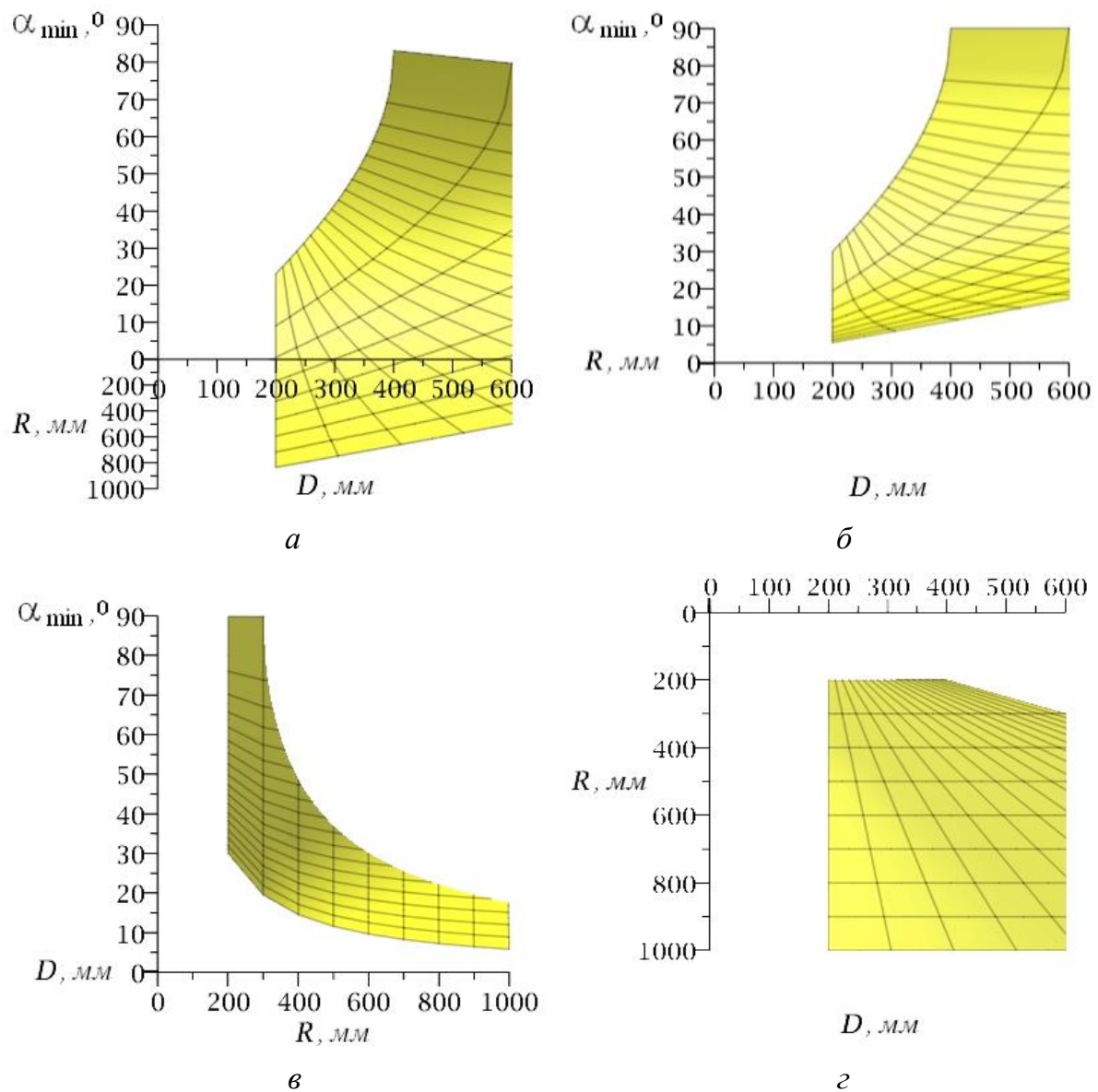


Рис. 4.3. Змінювання кута $\alpha_{\min}$ для $R \in [200 \text{ мм}, 1000 \text{ мм}]$, $D \in [200 \text{ мм}, 600 \text{ мм}]$:

$a, б, в, г$ – види з різних ракурсів

Наведене зображення містить також радіус R сферичної поверхні, який виходить з її центра O_{cf} , вісь OO_{cf} обертання диска та кут φ необхідного його мінімального повороту для забезпечення нормальної експлуатації підгортача. Порівняно з рис. 4.1, прямокутну систему координат $Oxuz$ перенесено вздовж осі u вліво на відстань l , яка повинна бути не тільки більшою за висоту належного сферичного сегмента, а й брати до уваги наявні конструкційні елементи. Цим забезпечується те, що тепер точка O на виді зверху збігається з віссю повороту диска на кут α в горизонтальній площині. Вихідне його положення показано штриховою лінією, а повернуте – суцільною.

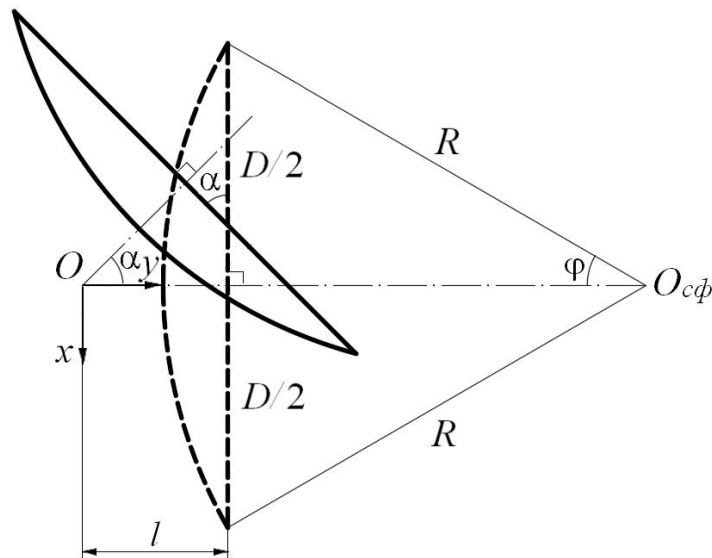


Рис. 4.4. Схема повороту лівого диска на кут α навколо вертикальної осі стояка (вид зверху на підгортач)

Таким чином, проаналізовані в даному підрозділі схеми, на додачу до поданої на рис. 2.4 базової конструкції досліджуваного дискового підгортача, дозволяють перейти до опису запропонованого математичного апарату визначення профілю борозни опрацьовуваного сільськогосподарського знаряддя.

4.2. Математичний апарат побудови профілів борозни

Застосуємо спочатку рис. 4.1 та його систему координат $Oxyz$. Рівняння розташованого у площині Oxz кола діаметром D з центром у точці O , яке є основою сферичного сегмента диска та визначає, після належних поворотів, разом із правим (другим) диском, утворювану підгортачем борозну, має вигляд

$$x = \frac{D}{2} \cos(u), \quad y = 0, \quad z = -\frac{D}{2} \sin(u), \quad (4.11)$$

де $u \in [0^\circ, 360^\circ]$ – параметр у вигляді кута, що відраховується від осі x протиіменно годинниковій стрілці.

Використовуватимемо далі прямокутну систему координат $Oxyz$, подану на рис. 4.4, початок якої у площині Oxy збігається з горизонтальною проєкцією осі обертання стояка підгортача.

Тоді рівняння (4.11) перетворюються в

$$x = \frac{D}{2} \cos(u), \quad y = l, \quad z = -\frac{D}{2} \sin(u), \quad (4.12)$$

де l – відстань від початку системи координат до центра основи сферичного сегмента.

Виконаємо поворот диска навколо точки O на кут α , який задовольняє умові (4.2). Аналітичний опис цієї фігури одержуємо на основі співвідношень (4.12) і належних матриць перетворення координат

$$[x \ y \ z \ 1] \cdot \begin{bmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha & 0 & 0 \\ -\sin \alpha & \cos \alpha & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = [x \cos \alpha - y \sin \alpha \quad x \sin \alpha + y \cos \alpha \quad z \quad 1].$$

У результаті для лівого (першого) диска

$$\begin{aligned} x &= \frac{D}{2} \cos \alpha \cos(u) - l \sin \alpha, \\ y &= \frac{D}{2} \sin \alpha \cos(u) + l \cos \alpha, \\ z &= -\frac{D}{2} \sin(u), \end{aligned} \quad (4.13)$$

де $u \in [0^\circ, 360^\circ]$.

Рівняння основи сферичного сегмента повернутого правого (другого) диска (див. рис. 4.5) обумовлюється симетрією робочих поверхонь даного знаряддя та необхідною відстанню $B/2$ до середини опрацьовуваного рядка ґрунту. Ця дистанція забезпечується кріпильними кронштейнами, показаними на рис. 2.4. В описаний спосіб формується базова геометрія проєктованого підгортача. Зауважимо, що визначення габаритного розміру b_3 подається далі.

Отже, на основі виразів (4.13) для правого (другого) диска отримуємо

$$\begin{aligned} x &= \frac{D}{2} \cos \alpha \cos(u) - l \sin \alpha, \\ y &= B - \frac{D}{2} \sin \alpha \cos(u) - l \cos \alpha, \\ z &= -\frac{D}{2} \sin(u), \end{aligned} \quad (4.14)$$

де $u \in [0^\circ, 360^\circ]$.

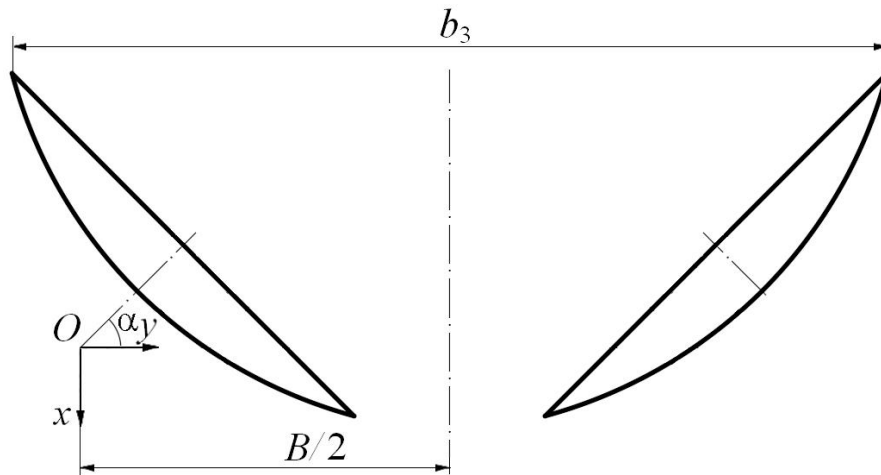


Рис. 4.5. Експлуатаційне позионування дисків підгортача
(вид зверху на знаряддя)

Рис. 4.6 ілюструє залежність лівого профілю борозни від глибини a обробітку ґрунту. Зазначимо, що вказана ситуація суттєво простіша за викладену в пункті 3.2.1 дисертації (див. рис. 3.12). Це обумовлено відсутністю тісної взаємодії між лівим і правим дисками та не використання кута β їхнього відхилення від вертикалі. Даний випадок показує розповсюдження запропонованого для сошників більш складного математичного апарату на інші подібні дискові ґрунтообробні знаряддя.

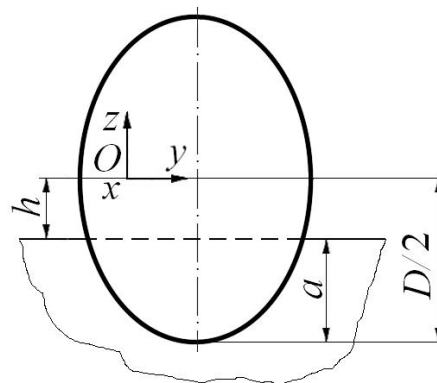


Рис. 4.6. Залежність лівого профілю борозни від глибини a обробітку ґрунту
(вид за напрямом руху підгортача)

Як видно зі співвідношень (4.13) і (4.14) та рис. 4.5 і рис. 4.6, правий профіль борозни відносно поздовжньої осі опрацьовуваного рядка ґрунту буде симетричним наведеному вище зображенню. З останнього також бачимо, що

$$h = \frac{D}{2} - a, \quad (4.15)$$

де h – відстань до землі.

Із застосуванням аплікату (4.13) і (4.14) та виразу (4.15)

$$h = \frac{D}{2} - a = \frac{D}{2} \sin(u_{\epsilon}), \quad (4.16)$$

де u_{ϵ} – параметр, який відповідає початковим точкам кіл дисків на висоті h .

З формули (4.16) маємо

$$u_{\epsilon} = \arcsin\left(1 - \frac{2a}{D}\right). \quad (4.17)$$

Максимальна глибина обробітку диском згідно з виданням [62] становить орієнтовно дві третини його радіуса, тобто

$$a_{\max} = \frac{D}{2} \cdot \frac{2}{3} = \frac{D}{3}. \quad (4.18)$$

На основі залежностей (4.17) і (4.18)

$$\begin{aligned} u_{\min} &= \arcsin\left(1 - \frac{2a_{\max}}{D}\right) = \arcsin\left(1 - \frac{2D}{3D}\right) = \arcsin\left(\frac{1}{3}\right) \approx 19,5^{\circ}, \\ u_{\max} &= 180^{\circ} - u_{\min} = 180^{\circ} - 19,5^{\circ} = 160,5^{\circ}, \end{aligned} \quad (4.19)$$

де $u_{\min}$, $u_{\max}$ – це мінімальна та максимальна величина параметра дуги кола диска, яка формує профіль борозни.

Отже,

$$u \in [u_{\min}, u_{\max}] = [19,5^{\circ}; 160,5^{\circ}]. \quad (4.20)$$

Для конкретної дуги

$$u \in [u_{\epsilon}, 180^{\circ} - u_{\epsilon}], u_{\epsilon} < 90^{\circ}. \quad (4.21)$$

Теоретичний профіль борозни підгортача розраховується за ординатами й аплікатами (4.13) і (4.14). При цьому беруться до уваги величини $u_{\min}$, $u_{\max}$ та u_{ϵ} співвідношень (4.19) ... (4.21). Для забезпечення наочності отримуваних графіків переносимо площину Oxy на рівень дна борозни. Тоді аплікати дорівнюватимуть

$$z(u) = -\frac{D}{2} \sin(u) + \frac{D}{2} = \frac{D}{2} (1 - \sin(u)). \quad (4.22)$$

На рис. 4.7 наведено повний профіль борозни, утворений лівим (першим) і правим (другим) дисками, для певної глибини обробітку a .

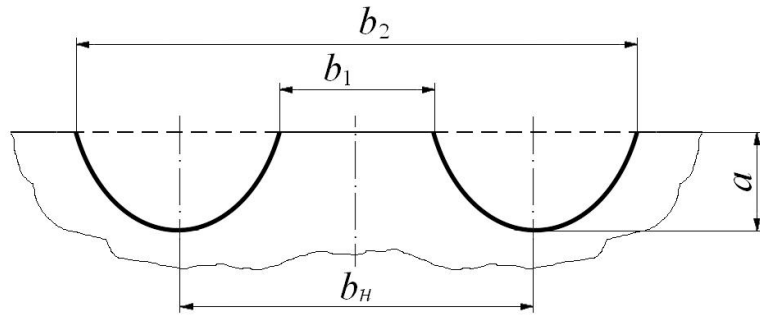


Рис. 4.7. Повний профіль борозни підгортача
(вид за напрямом руху знаряддя)

Згідно з виразами (4.13) та (4.14) найнижчі точки дисків відповідають параметру $u=90^\circ$. Тоді

$$\begin{aligned} b_H &= \left(B - \frac{D}{2} \sin \alpha \cos(90^\circ) - l \cos \alpha\right) - \\ &\quad - \left(\frac{D}{2} \sin \alpha \cos(90^\circ) + l \cos \alpha\right) = \\ &= B - 2l \cos \alpha. \end{aligned} \quad (4.23)$$

Правильність формули (4.23) підтверджує рис. 4.5. Значення мінімальної відстані між лівим і правим профілем (мінімальна ширина гребеня) розраховується як

$$\begin{aligned} b_1 &= B - \frac{D}{2} \sin \alpha \cos(u_g) - l \cos \alpha - \frac{D}{2} \sin \alpha \cos(u_g) - l \cos \alpha = \\ &= B - D \sin \alpha \cos(u_g) - 2l \cos \alpha. \end{aligned} \quad (4.24)$$

За аналогією ширина борозни

$$\begin{aligned} b_2 &= B - \frac{D}{2} \sin \alpha \cos(180^\circ - u_g) - l \cos \alpha - \frac{D}{2} \sin \alpha \cos(180^\circ - u_g) - l \cos \alpha = \\ &= B + D \sin \alpha \cos(u_g) - 2l \cos \alpha. \end{aligned} \quad (4.25)$$

З використанням виразів (4.24) та (4.25) маємо

$$\begin{aligned} b_2 - b_1 &= B + D \sin \alpha \cos(u_g) - 2l \cos \alpha - (B - D \sin \alpha \cos(u_g) - 2l \cos \alpha) = \\ &= 2D \sin \alpha \cos(u_g). \end{aligned} \quad (4.26)$$

У справедливості співвідношення (4.26) переконуємося наступним чином. Рис. 4.7 свідчить, що це значення дорівнює двократній проєкції хорди кола діаметром D на висоті обробітку a на площину, перпендикулярну напрямку руху підгортача. Натуральна величина вказаної хорди

$$D \cos(u_{\theta}). \quad (4.27)$$

Після повороту диска навколо вертикальної осі на кут α проєкція хорди (4.27) на нормальну до переміщення знаряддя площину становитиме

$$D \cos(u_{\theta}) \sin \alpha. \quad (4.28)$$

Подвійне значення (4.28) є залежністю (4.26), що і треба було довести.

Габаритний розмір на рис. 4.5 (див. також рис. 4.4)

$$b_3 = B - 2l \cos \alpha + D \sin \alpha. \quad (4.29)$$

На підгортачі також розповсюджується запропонований у підрозділі 2.3 метод граничних оцінок впливу профілю борозни на експлуатаційні енергетичні характеристики ґрунтообробних знарядь з метою синтезу варіантів та їх оптимізації. Порядок дій схожий з викладеним у підрозділі 3.3 для сошників.

Шляхом застосування поданого вище математичного апарату та рис. 4.6 і рис. 4.7 здійснимо аналітичну дефініцію площі A профілю борозни підгортача з дисками діаметром D , кутом α їхнього встановлення та глибиною a обробітку. На основі інтеграла для обчислення площі криволінійної трапеції, обмеженої параметричною кривою, та симетричності профілю борозни відносно вертикальної площини, яка проходить через середину оброблюваного рядка ґрунту, маємо:

$$A = 2 \cdot \left((y_{\theta} - y_{\theta 2}) \cdot a - \int_{u_{\theta 2}}^{u_{\theta}} z(u) y'(u) du \right), \quad (4.30)$$

де $y(u)$ – ордината лівого (першого) диска;

$z(u)$ – за формулою (4.22);

u_{θ} згідно з виразом (4.17);

$u_{\theta 2} = 180^\circ - u_{\theta}$;

$y_{\theta} = y(u_{\theta})$, $y_{\theta 2} = y(u_{\theta 2})$.

Обчислюємо похідну

$$y'(u) = -\frac{D}{2} \sin \alpha \sin(u) \quad (4.31)$$

та інтеграл залежності (4.30)

$$\begin{aligned} \int_{u_{\theta 2}}^{u_{\theta}} z(u) y'(u) du &= - \int_{u_{\theta 2}}^{u_{\theta}} \frac{D}{2} (1 - \sin(u)) \frac{D}{2} \sin \alpha \sin(u) du = \\ &= \frac{D^2}{4} \sin \alpha \int_{u_{\theta}}^{u_{\theta 2}} (1 - \sin(u)) \sin(u) du = \\ &= \frac{D^2}{4} \sin \alpha \cdot \left(\int_{u_{\theta}}^{u_{\theta 2}} \sin(u) du - \int_{u_{\theta}}^{u_{\theta 2}} \sin^2(u) du \right) = \\ &= \frac{D^2}{4} \sin \alpha \cdot \left(\cos(u) \Big|_{u_{\theta 2}}^{u_{\theta}} + \frac{2u - \sin(2u)}{4} \Big|_{u_{\theta 2}}^{u_{\theta}} \right). \end{aligned} \quad (4.32)$$

Акцентуємо увагу, що через взаємодію лівого та правого дисків підгортача початковий проміжок (4.2) змінювання кута може обмежуватися максимальною величиною, яка впливає з нерівності (див. рис. 4.4 та рис. 4.5)

$$l \cos \alpha_{\max} + \frac{D}{2} \sin \alpha_{\max} < \frac{B}{2}. \quad (4.33)$$

Таким чином, у даному підрозділі дисертації, спираючись на попередні викладені теоретичні напрацювання, подано математичний апарат керування профілем борозни дискових підгортачів, який забезпечує інтеграцію конструкційних та експлуатаційних параметрів і характеристик зазначених ґрунтообробних знарядь.

4.3. Практичні приклади

4.3.1. Керування профілем борозни

З використанням твердження 4.1 і співвідношень (4.13) ... (4.33) створено наведену в пункті А.3.1 додатків комп'ютерну програму системи математичного моделювання Maple, яка будує профілі борозни та обчислює їхні площі для розглянутих дискових підгортачів. При цьому опрацьовано наступні базові множини конструкційно-експлуатаційних параметрів зазначених засобів:

$$D = (300 \text{ мм}, 350 \text{ мм}, 400 \text{ мм}), \quad (4.34)$$

$$R = (350 \text{ мм}, 500 \text{ мм}, 650 \text{ мм}), \quad (4.35)$$

$$B \in [300 \text{ мм}, 800 \text{ мм}], \quad (4.36)$$

$$\alpha \in [\alpha_{\min}, 90^0), \quad (4.37)$$

$$a \in [30 \text{ мм}, 100 \text{ мм}], \quad (4.38)$$

де D – діаметри дисків;

R – радіуси їхніх сферичних поверхонь;

B – відстань між осями обертання;

α – кути повороту дисків;

a – глибина обробітку.

На підставі виразу (2.20) для висоти сферичного сегмента диска маємо

$$h_{сф} = R - \sqrt{R^2 - D^2 / 4}. \quad (4.39)$$

Відстань від осі O обертання диска до центра основи його сферичного сегмента (див. рис. 4.4) з урахуванням величини (4.39) дорівнює

$$l = [h_{сф}] + 1 + l_{кнс}, \quad (4.40)$$

де $l_{кнс}$ – довжина для реалізації необхідної конструкції.

Обчислені за формулами (4.34), (4.35), (4.39), (4.40), (4.1) та (4.2) значення проєктних конструкційних параметрів підгортачів наведено в табл. 4.1.

Проєктні конструкційні параметри підгортачів

Таблиця 4.1

$D, \text{мм}$	$R, \text{мм}$	$[h_{сф}] + 1, \text{мм}$	$l_{кнс}, \text{мм}$	$l, \text{мм}$	$\alpha_{\min}, ^\circ$
300	350	34	60	94	26
	500	24	60	84	18
	650	18	60	78	14
350	350	47	60	107	30
	500	32	60	92	21
	650	24	60	84	16
400	350	63	60	123	35
	500	42	60	102	24
	650	32	60	92	18

На рис. 4.8 ... 4.10 показано кілька профілів борозни, що відповідають даним табл. 4.1 та множинам (4.36) ... (4.38). Для забезпечення кращої інформативності зображень на них використано найбільшу глибину обробки $a=100$ мм опрацьовуваного проміжку (4.38).

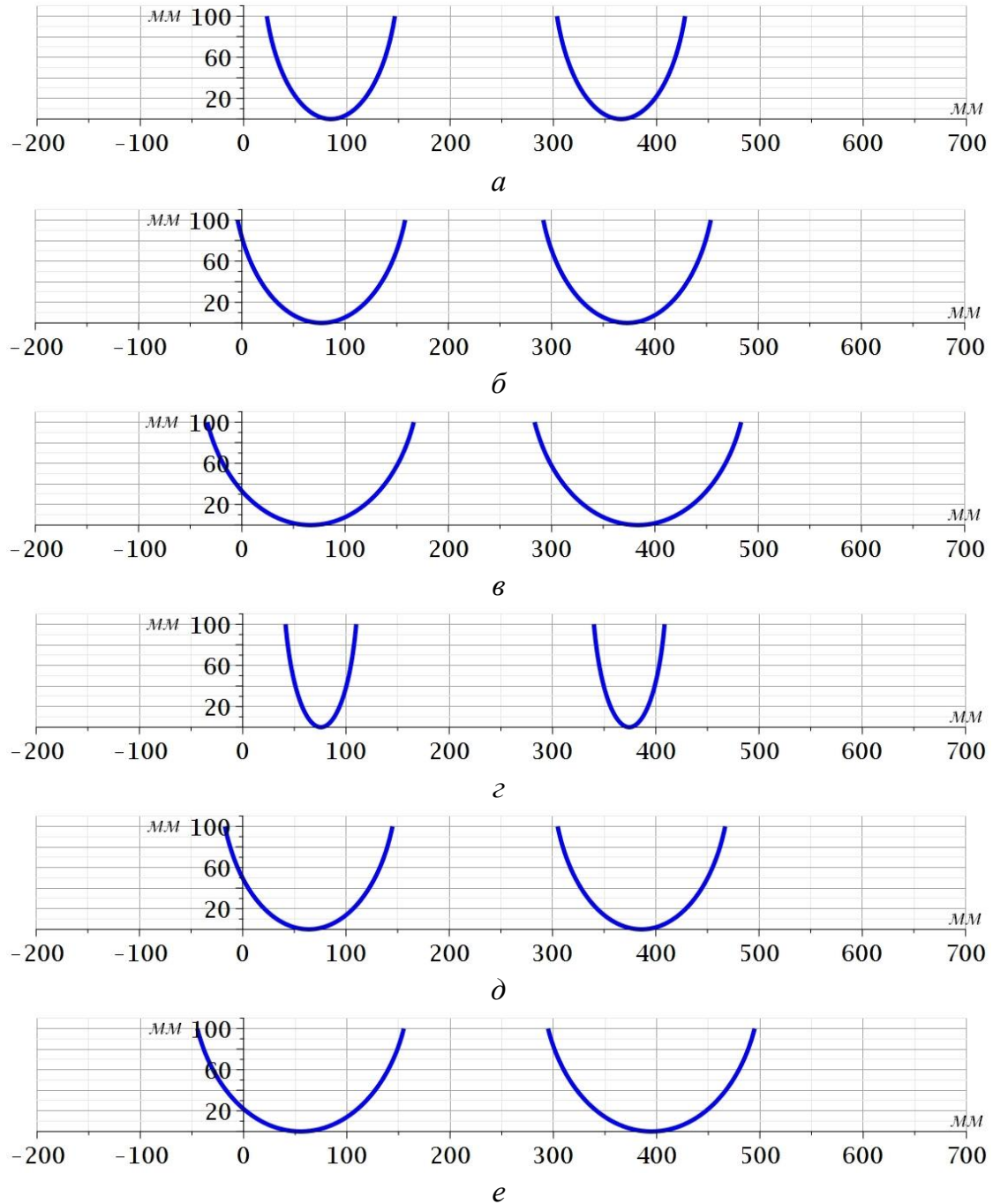


Рис. 4.8. Профілі борозни підгортача $D=300$ мм, $B=450$ мм, $a=100$ мм:

$a - R=350$ мм, $\alpha=26^\circ$; $б - R=350$ мм, $\alpha=35^\circ$; $в - R=350$ мм, $\alpha=45^\circ$;

$г - R=650$ мм, $\alpha=14^\circ$; $д - R=650$ мм, $\alpha=35^\circ$; $е - R=650$ мм, $\alpha=45^\circ$

Деякі експлуатаційні геометричні параметри борозен рис. 4.8 ... 4.10 містить табл. 4.2 з позначеннями рис. 4.7 і рис. 4.5 та площею A профілів.

Проаналізуємо певні факти, представлені на трьох останніх рисунках. Так, зокрема, бачимо, що зі зростанням кута α повороту дисків мінімальна відстань b_1 між лівим і правим профілями борозни зменшується, а такі величини, як b_n , b_2 та b_3 – збільшуються. Це ж стосується і площі A .

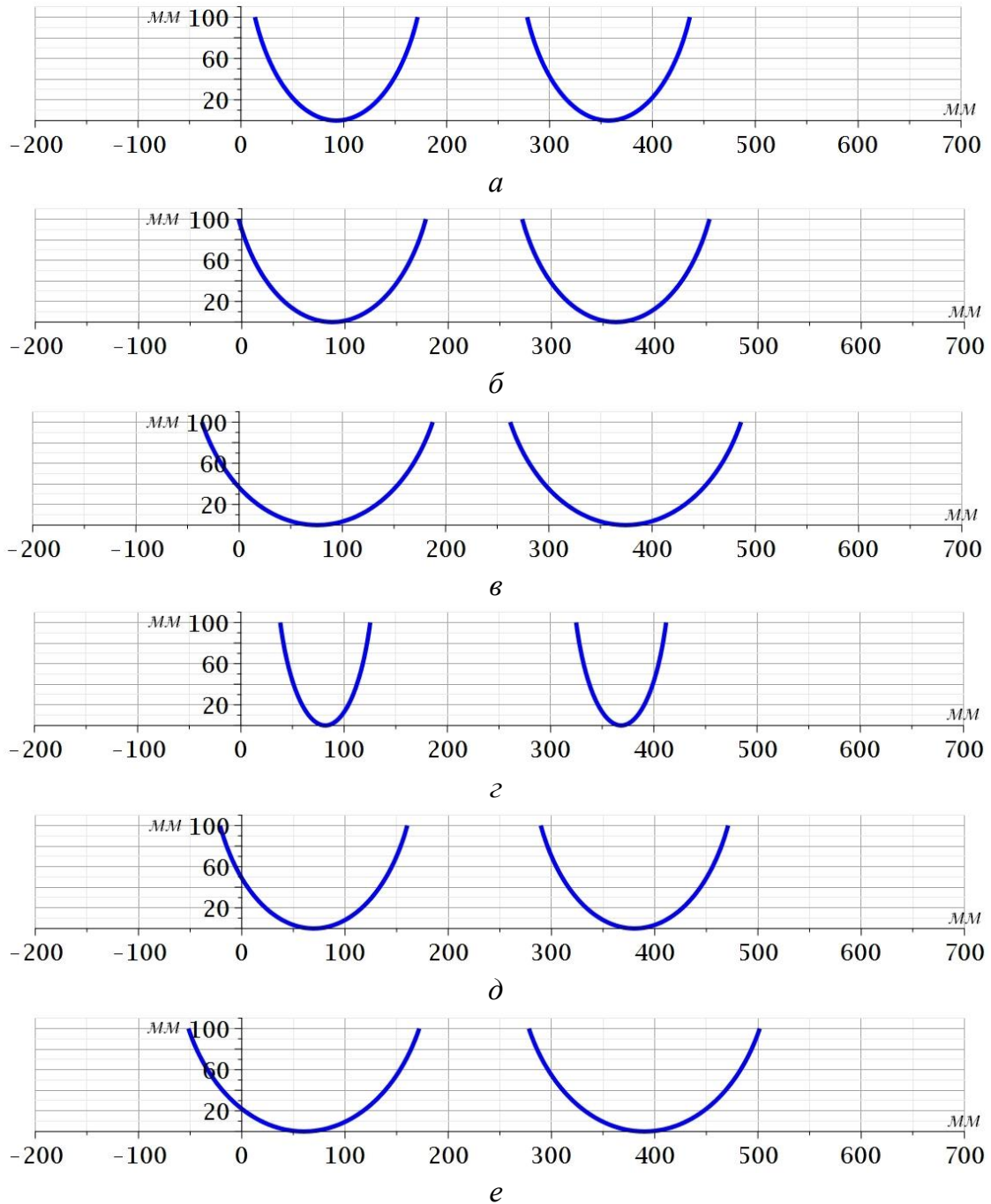


Рис. 4.9. Профілі борозни підгортача $D=350$ мм, $B=450$ мм, $a=100$ мм:

$a - R=350$ мм, $\alpha=30^\circ$; $б - R=350$ мм, $\alpha=35^\circ$; $в - R=350$ мм, $\alpha=45^\circ$;

$г - R=650$ мм, $\alpha=16^\circ$; $д - R=650$ мм, $\alpha=35^\circ$; $е - R=650$ мм, $\alpha=45^\circ$

Для кращого сприйняття табл. 4.2 дані середнього рис. 4.9 у ній виділено іншим кольором.

Представлені зображення свідчать, що при $\alpha > \sim 30^\circ$ маємо відносно велику площу A борозни та, як наслідок, значний об'єм ґрунту, що підгортається. Також при цьому зростають енергетичні витрати. Застосування вказаних варіантів може виправдовуватися певними наявними обставинами.

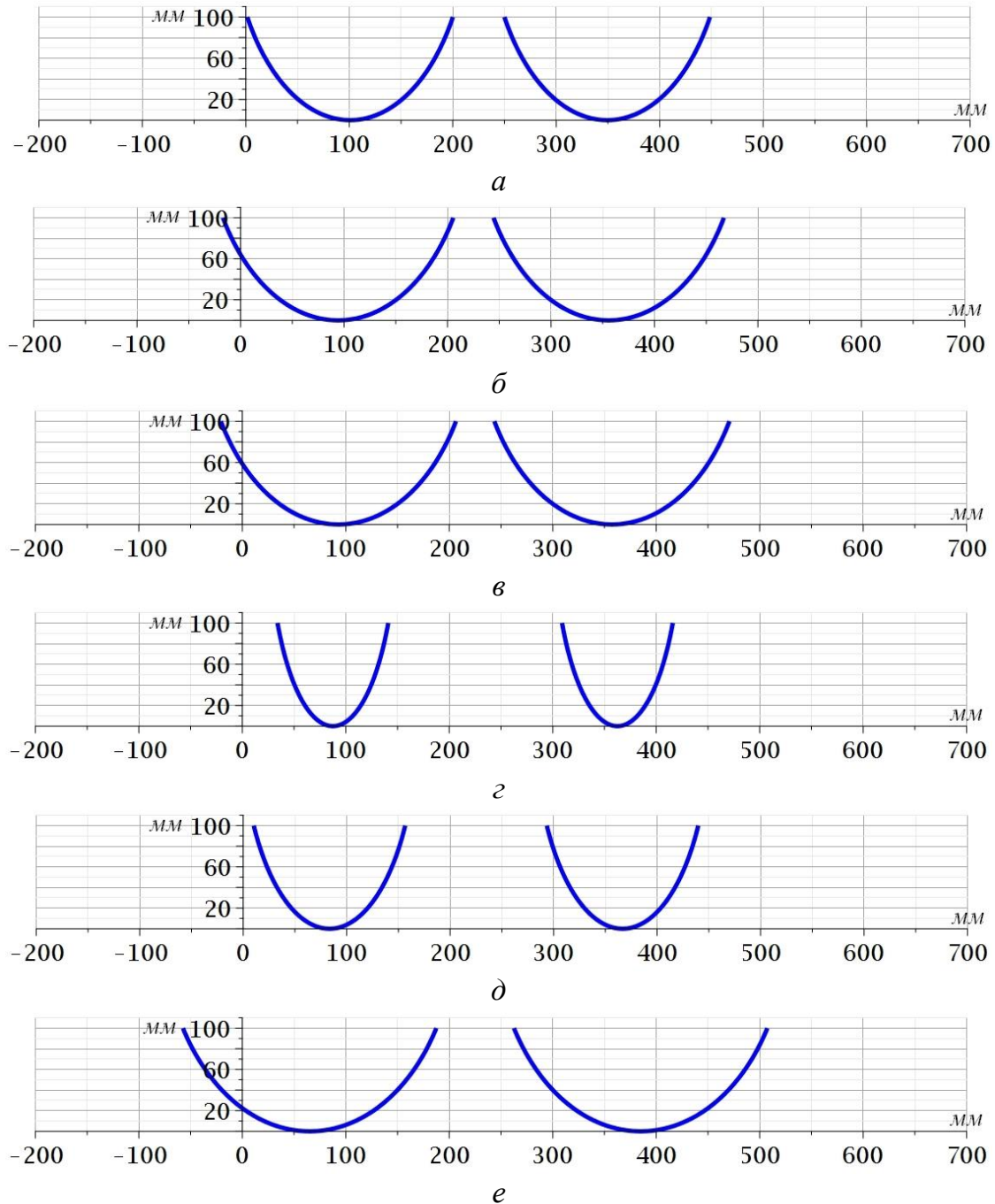


Рис. 4.10. Профілі борозни підгортача $D=400$ мм, $B=450$ мм, $a=100$ мм:

$a - R=350$ мм, $\alpha=35^\circ$; $б - R=350$ мм, $\alpha=40^\circ$; $в - R=350$ мм, $\alpha=41^\circ$;

$г - R=650$ мм, $\alpha=18^\circ$; $д - R=650$ мм, $\alpha=25^\circ$; $е - R=650$ мм, $\alpha=45^\circ$

Зауважимо, що у випадку рис. 4.10 в при $\alpha=41^\circ$ досягнуто обмеження (4.33), що ілюструє рис. 4.11.

Експлуатаційні геометричні параметри та характеристики борозен Таблиця 4.2

Профіль	$b_1, \text{мм}$	$b_n, \text{мм}$	$b_2, \text{мм}$	$b_3, \text{мм}$	$A, \text{мм}^2$
рис. 4.8 а	157	281	405	413	18083
рис. 4.8 б	134	296	458	468	23661
рис. 4.8 в	117	317	517	529	29169
рис. 4.8 г	230	299	367	371	9980
рис. 4.8 д	160	322	484	494	23661
рис. 4.8 е	140	340	540	552	29169
рис. 4.9 а	107	265	423	440	22683
рис. 4.9 б	93	275	456	475	26021
рис. 4.9 в	75	299	522	546	32079
рис. 4.9 г	199	287	374	383	12505
рис. 4.9 д	129	311	492	511	26021
рис. 4.9 е	106	330	553	577	32079
рис. 4.10 а	50	248	447	478	28183
рис. 4.10 б	39	262	484	519	31583
рис. 4.10 в	37	264	492	527	32235
рис. 4.10 г	168	275	382	399	15183
рис. 4.10 д	137	283	430	452	20765
рис. 4.10 е	75	320	565	603	34744

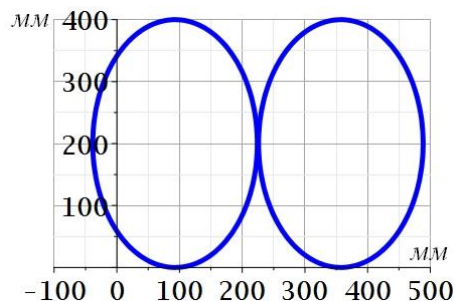


Рис. 4.11. Проекція дисків на поперечну вертикальну площину зняття
при $D=400 \text{ мм}$, $B=450 \text{ мм}$, $R=350 \text{ мм}$, $\alpha=41^\circ$

Акцентуємо також увагу на тому, що зі збільшення кута α повороту дисків нахил бічних стінок борозни спадає.

Розглянемо на кількох прикладах адаптацію наведених профілів борозни до конкретних аграрних умов. Актуальність даного питання підтверджують, зокрема, публікації [8, 95]. Оберемо, як базові, показані на рис. 4.8 *a* та рис. 4.8 *z* проєктні варіанти. У них, завдяки відносно невеликому куту α , габаритний розмір $b_3 \in (413 \text{ мм}, 371 \text{ мм}) < B = 450 \text{ мм}$ (див. табл. 4.2). Це означає, що величина оброблювальних міжрядь орієнтовно становить приблизно 500 мм.

У виданні [27] указується, що для технічних, овочевих та інших сільськогосподарських культур, які потребують належної площі живлення й міжрядного обробітку, застосовується спосіб сівби з шириною міжрядь 300 ... 900 мм. Підгортачі використовуються для нагортання землі навколо рослин із метою стимуляції їхнього росту, знищення бур'янів, покращення аерації ґрунту, його дренажу, розпушування тощо. Даний технологічний процес здійснюється 1-2 рази протягом вегетаційного періоду. Унаслідок різноманітних факторів при малих міжряддях суттєво збільшується ймовірність пошкодження коріння. Тому зазначена операція потребує підвищеної точності виконання.

Припустимо, що з точки зору певних агрономічних вимог треба зменшити опрацьовувані відстані між рядками для відібраних різновидів профілів борозни. Нехай це буде варіант рис. 4.8 *z*, оскільки в нього достатньо велике значення $b_1 = 230 \text{ мм}$ (див. табл. 4.2). Отриману борозну показано на рис. 4.12, її дані містить табл. 4.3.

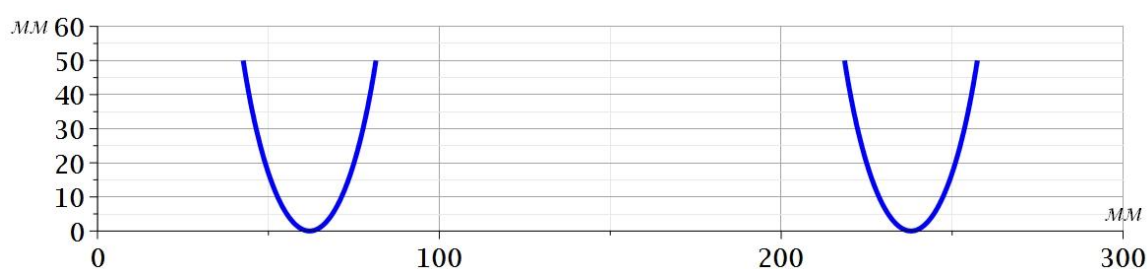


Рис. 4.12. Профіль борозни для $D=300 \text{ мм}$, $B=300 \text{ мм}$, $a=50 \text{ мм}$,
 $R=900 \text{ мм}$, $\alpha=10^\circ$, $l_{\text{кнс}}=50 \text{ мм}$

Геометричні параметри та характеристики борозни рис. 4.12 *Таблиця 4.3*

$b_1, \text{ мм}$	$b_n, \text{ мм}$	$b_2, \text{ мм}$	$b_3, \text{ мм}$	$A, \text{ мм}^2$
137	176	215	228	2689

З рис. 4.12 і табл. 4.3 видно, що ширина гребеня наведеної борозни збільшується з 137 мм на рівні землі до 176 мм на максимальній глибині обробітку $a=50$ мм. Теоретична величина міжрядь при цьому становить

$$B_{\text{мжр}} = \max(B, b_3) + b_{\text{кнс-експ}}, \quad (4.41)$$

де $b_{\text{кнс-експ}}$ – це значення, що залежить від конкретної конструкції та умов експлуатації проєктованого знаряддя.

Нехай у нашому випадку

$$b_{\text{кнс-експ}} = 50 \text{ мм}. \quad (4.42)$$

Тоді, на підставі виразів (4.41) і (4.42), маємо

$$\begin{aligned} B_{\text{мжр}} &= \max(B, b_3) + b_{\text{кнс-експ}} = \\ &= \max(300 \text{ мм}, 228 \text{ мм}) + 50 \text{ мм} = 350 \text{ мм}. \end{aligned} \quad (4.43)$$

Величина (4.43) свідчить, що отримано бажане зменшення міжряддя.

Продемонструємо на прикладі рис. 4.8 а, навпаки, збільшення ширини міжрядь за допомогою вже розглянутого параметра B , тобто відстані між осями обертання дисків. Отже, одержуємо наступні результати (рис. 4.13 і табл. 4.4).

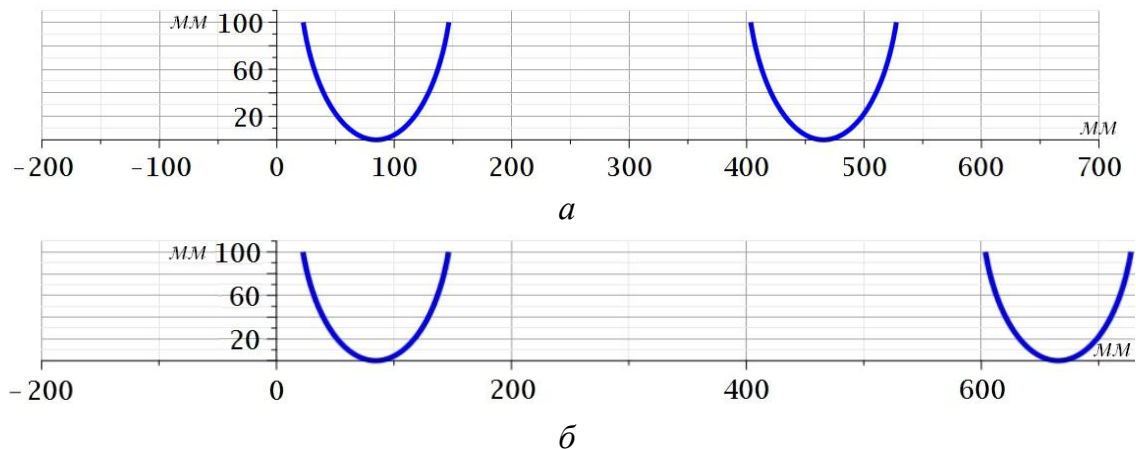


Рис. 4.13. Борозна підгортача $D=300$ мм, $R=350$ мм, $a=100$ мм, $\alpha=26^\circ$, $l_{\text{кнс}}=60$ мм:

$a - B=550$ мм; $б - B=750$ мм

Геометричні параметри та характеристики борозен рис. 4.13 Таблиця 4.4

Профіль	b_1 , мм	b_n , мм	b_2 , мм	b_3 , мм	A , мм ²
рис. 4.13 а	257	381	505	513	18083
рис. 4.13 б	457	581	705	713	18083

У цьому разі, на відміну від попереднього, модифікується тільки один параметр B . Тому, на основі відповідних даних табл. 4.2, значення табл. 4.4, крім *Профілю* та площі A , які залишаються сталими, обчислюються додаванням змінювання вказаної величини B . У випадку рис. 4.13 а це

$$\Delta B_1 = B_1 - B_0 = 550 \text{ мм} - 450 \text{ мм} = 100 \text{ мм}. \quad (4.44)$$

Аналогічно залежностям (4.41) ... (4.43), маємо

$$\begin{aligned} B_{\text{мжр}} &= \max(B, b_3) + b_{\text{кнс-експ}} = \\ &= \max(550 \text{ мм}, 513 \text{ мм}) + 50 \text{ мм} = 600 \text{ мм}. \end{aligned} \quad (4.45)$$

Можна розв'язати й обернену до співвідношень (4.44) та (4.45) задачу, тобто коли відоме потрібне міжряддя, наприклад,

$$B_{\text{мжр}} = 800 \text{ мм}. \quad (4.46)$$

Тоді з виразів (4.45) і (4.46)

$$B_2 = B_{\text{мжр}} - b_{\text{кнс-експ}} = 800 \text{ мм} - 50 \text{ мм} = 750 \text{ мм}. \quad (4.47)$$

З використанням величини (4.47),

$$\Delta B_2 = B_2 - B_0 = 750 \text{ мм} - 450 \text{ мм} = 300 \text{ мм}. \quad (4.48)$$

Значення (4.48) застосовано при заповненні рядка рис. 4.13 б табл. 4.4.

Також особливо важливим для обробітку ґрунту є такий конструкційно-експлуатаційний параметр, як кут α повороту дисків навколо вертикальних осей їхніх стояків. Розглянемо зазначене питання на прикладі борозни рис. 4.13 а з доволі розповсюдженим на практиці міжряддям $B_{\text{мжр}}=600 \text{ мм}$.

Як уже акцентувалось вище, зростання кута α зменшує b_1 і збільшує величини b_2 , b_3 та A . Кількісно оцінити це дозволяє напрацьований математичний апарат і відповідна створена комп'ютерна програма системи Maple, представлена в пункті А.3.1 додатків.

Нехай потрібно проаналізувати два нових кути $\alpha_1=30^\circ$ та $\alpha_2=33^\circ$ порівняно з вихідним $\alpha_0=26^\circ$.

Отримані результати приведено на рис. 4.14 та в табл. 4.5.

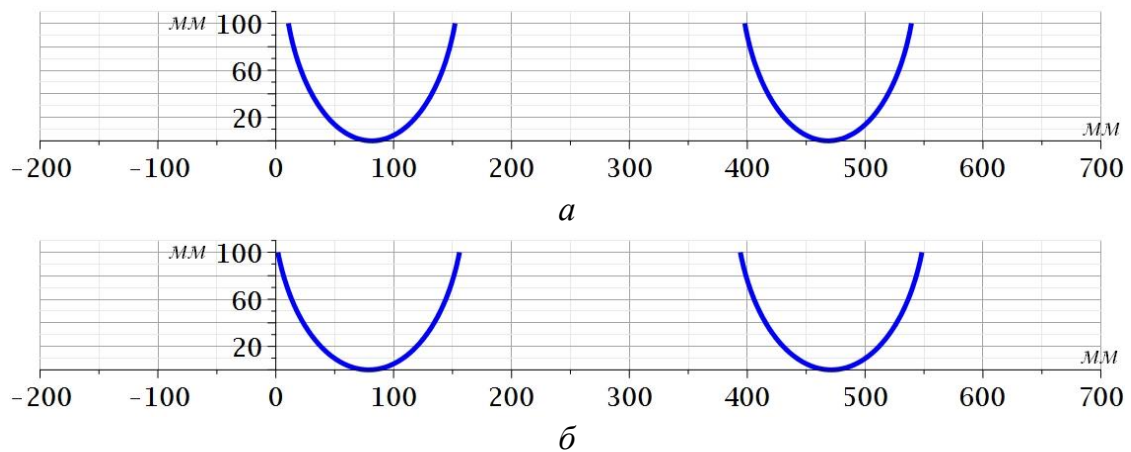


Рис. 4.14. Борозна підгортача $D=300$ мм, $R=350$ мм, $B=550$ мм, $l_{кнс}=60$ мм, $a=100$ мм:

$$a - \alpha=30^0; \quad б - \alpha=33^0$$

Геометричні параметри та характеристики борозен рис. 4.14 Таблиця 4.5

Профіль	b_1 , мм	b_n , мм	b_2 , мм	b_3 , мм	A , мм ²
рис. 4.14 а	246	387	529	537	20626
рис. 4.14 б	238	392	546	558	22467

Вважатимемо, що обидва нові варіанти задовольняють наявним аграрним вимогам стосовно необхідної форми і розмірів профілів борозен. Зауважимо, що у другому випадку, через те, що $b_3=558$ мм $>$ $B=550$ мм, ширина міжрядь стає

$$B_{мжр} = \max(B, b_3) + b_{кнс-експ} = \max(550 \text{ мм}, 558 \text{ мм}) + 50 \text{ мм} = 608 \text{ мм}.$$

Для прийняття остаточного рішення застосуємо запропонований у підрозділі 2.3 та проілюстрований у підрозділі 3.3 дисертації метод граничних оцінок впливу профілю борозни на експлуатаційні енергетичні характеристики ґрунтообробних знарядь. Згідно з указаним підходом та залежностями (3.42) і (3.43) для першого та другого опрацьовуваного варіанта, порівняно з вихідним, маємо наступні граничні оцінки енергетичних витрат

$$EB_1 = \left(\frac{A_1 - A_0}{A_0} \right) \cdot 100\% = \left(\frac{20626 \text{ мм}^2 - 18083 \text{ мм}^2}{18083 \text{ мм}^2} \right) \cdot 100\% \approx 14\%, \quad (4.49)$$

$$EB_2 = \left(\frac{A_2 - A_0}{A_0} \right) \cdot 100\% = \left(\frac{22467 \text{ мм}^2 - 18083 \text{ мм}^2}{18083 \text{ мм}^2} \right) \cdot 100\% \approx 24\%. \quad (4.50)$$

На підставі величин (4.49) і (4.50) вважаємо, що другий варіант є ризикованим щодо перекриття отримуваними прибутками від покращення сільськогосподарської діяльності збільшення витрат на енергетичні ресурси. Тому остаточно приймаємо борозну рис. 4.14 *a*.

Таким чином, у даному пункті дослідження на конкретних прикладах подано запропонований підхід для прогнозованого керування отримуваним профілем борозни розглянутих підгортачів залежно від діаметрів дисків і радіусів їхніх сферичних поверхонь, кута орієнтації дисків відносно напрямку руху знаряддя, певних його конструкційно-експлуатаційних особливостей, глибини обробітку ґрунту.

4.3.2. Комп'ютерні твердотільні моделі

У цій частині дисертації представлені виконані на етапі ескізного проектування варіантні комп'ютерні твердотільні моделі (див. рис.4.15 ... 4.19) проаналізованих вище дискових підгортачів.

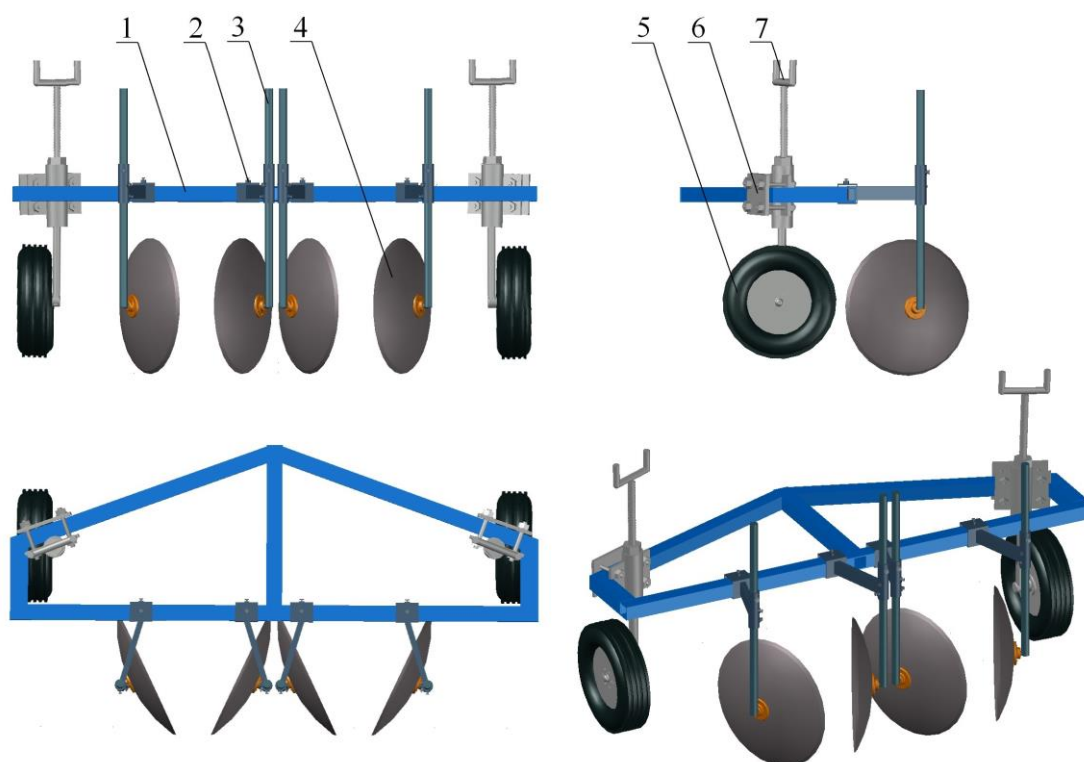


Рис. 4.15. Варіант 1 конструкції підгортача:

- 1 – рама; 2 – кріпильний кронштейн; 3 – стояк з віссю;
- 4 – диск із матчиною та вальницею; 5 – опорне колесо;
- 6 – кріпильний кронштейн опорного колеса; 7 – регулювальний гвинт

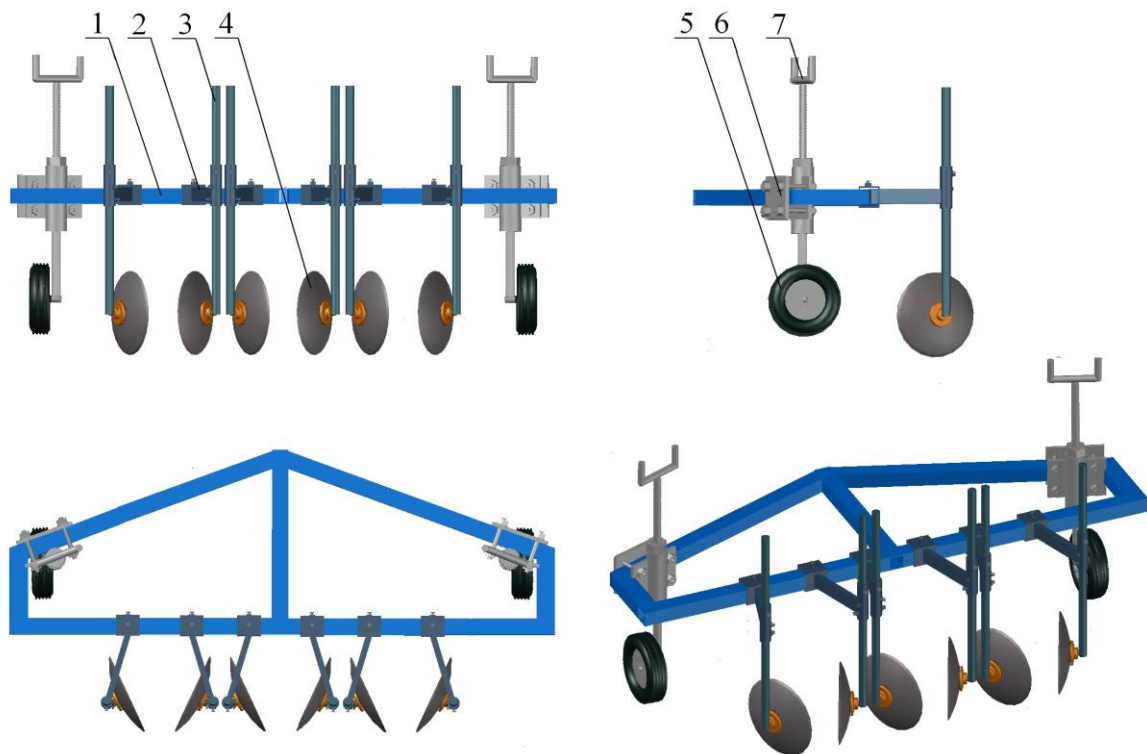


Рис. 4.16. Варіант 2 підгортача:

1 – рама; 2 – кріпильний кронштейн; 3 – стояк з віссю;

4 – диск із матчиною та вальницею; 5 – опорне колесо;

6 – кріпильний кронштейн опорного колеса; 7 – регулювальний гвинт

Кожен із цих рисунків містить чотири зображення: три ортогональні види (за напрямом руху знаряддя, з лівого боку і зверху) та аксонометричний. Як бачимо, в основу компоновання проєктованих підгортачів покладено базову концептуальну конструкцію, подану на рис. 2.4. Це підтверджує наявність її складових у всіх проєктованих різновидів даного засобу.

Варіант 1 призначений для обробітку двох рядків, а варіант 2 – трьох. У першому випадку міжряддя ширші, ніж у другому. Для збільшення кількості одночасно опрацьовуваних рядків, з певними дистанціями між ними, може застосовуватися, наприклад, на основі різновиду 1 варіант 3 знаряддя (рис. 4.17), який дозволяє обробляти чотири рядки за один прохід трактора. Це покращує продуктивність сільськогосподарської техніки, але вимагає належного зростання її потужності. Для варіанта 2 аналогічний різновид з опрацюванням замість трьох одночасно шести рядків (рис. А.14) представлено в пункті А.3.2 додатків. Опишемо далі адаптацію розроблених конструкцій до різноманітних аграрних вимог.

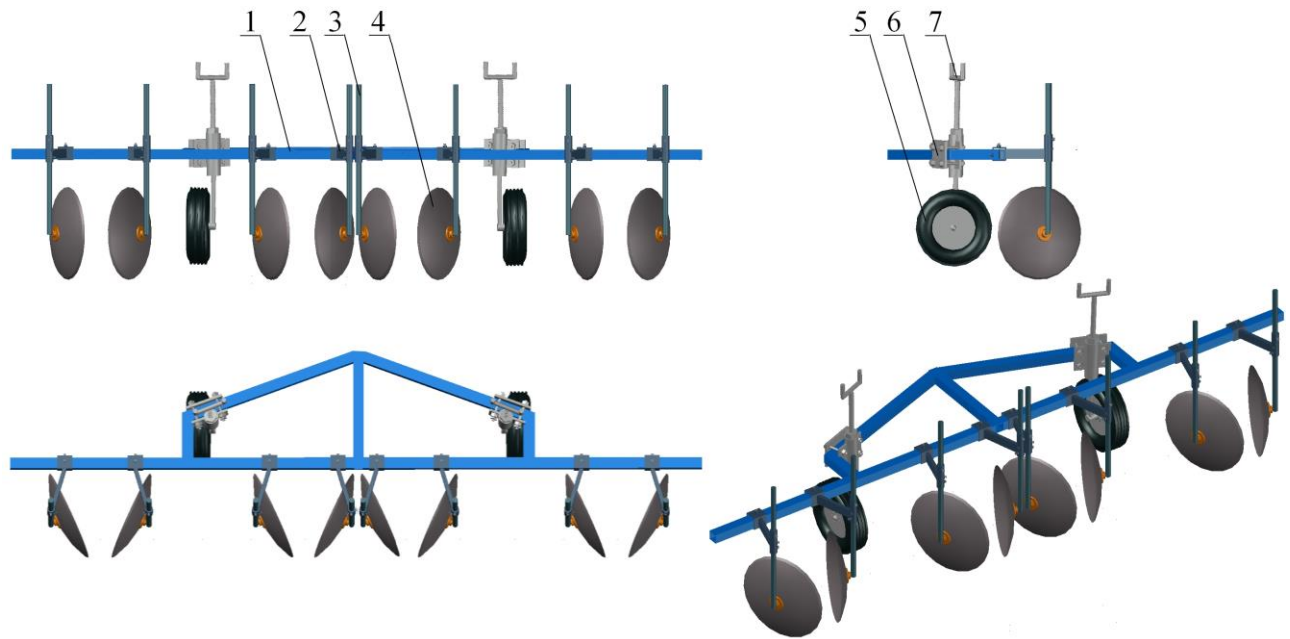


Рис. 4.17. Варіант 3 конструкції підгортача:

1 – рама; 2 – кріпильний кронштейн; 3 – стояк з віссю;

4 – диск із маточиною та вальницею; 5 – опорне колесо;

6 – кріпильний кронштейн опорного колеса; 7 – регулювальний гвинт

Наявними для цього конструкційними засобами є кронштейни 2 та 6 і регулювальний гвинт 7. Можуть бути також змінними диски з різними діаметрами та радіусами сферичних поверхонь. За допомогою переміщення кронштейнів 2 уздовж балки рами потрібним чином модифікується ширина борозни. Фіксацією в них на належній висоті стояків встановлюється глибина обробітку ґрунту, а також необхідний кут позиціонування дисків відносно напрямку руху знаряддя. Кронштейн 6 визначає положення опорних коліс. Регулювальний гвинт 7 дозволяє мати бажану висоту розташування рами над землею.

На рис. 4.18 і рис. 4.19 показано конструкційно-експлуатаційні модифікації варіантів 1 та 2, тобто засобів для опрацювання відповідно двох і трьох рядків. У першому випадку, порівняно з поданою на рис. 4.16 початковою конфігурацією, змінено диски, кути їхнього встановлення та глибину обробітку ґрунту. Ширина міжрядь залишилася сталою. Іншими словами, сформовано новий потрібний профіль борозни, який задовольняє певним аграрним вимогам.

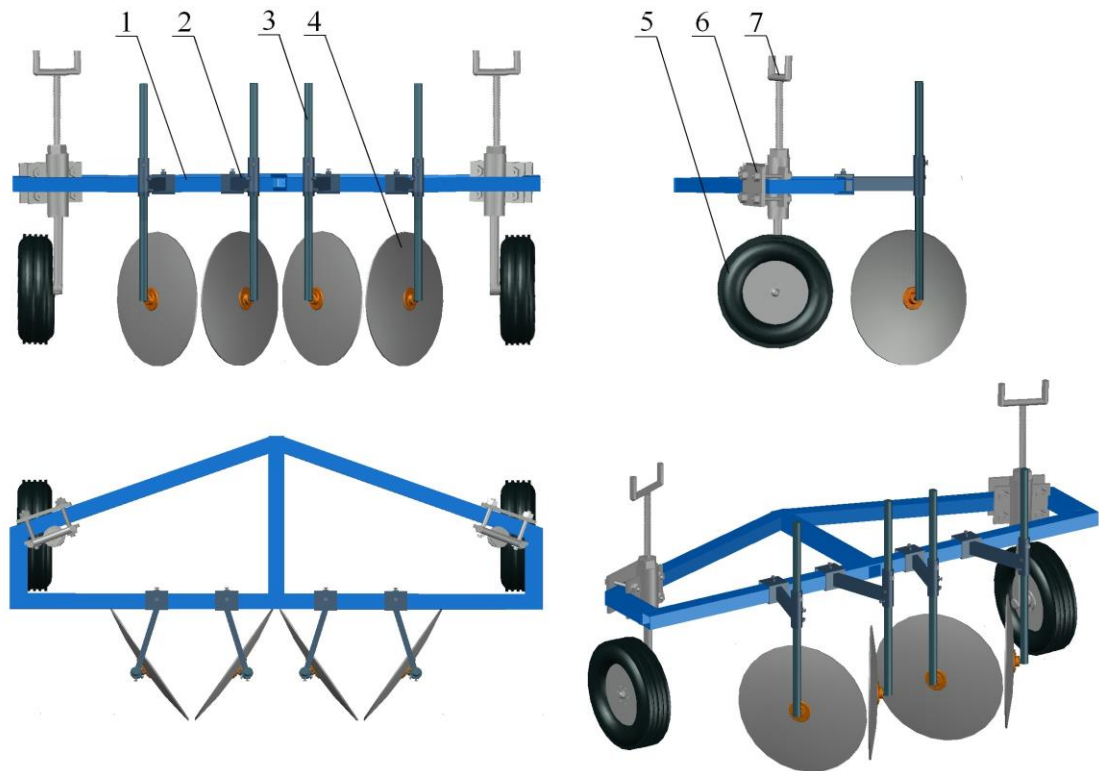


Рис. 4.18. Підгортач для оброблення двох рядків

У другому випадку, у порівнянні з наведеною на рис. 4.17 вихідною конфігурацією, теж змінено диски, кути їхнього встановлення залишено сталими, дещо відкориговано ширину міжрядь і глибину обробітку ґрунту. В описаний спосіб визначено конкретний необхідний профіль борозни,

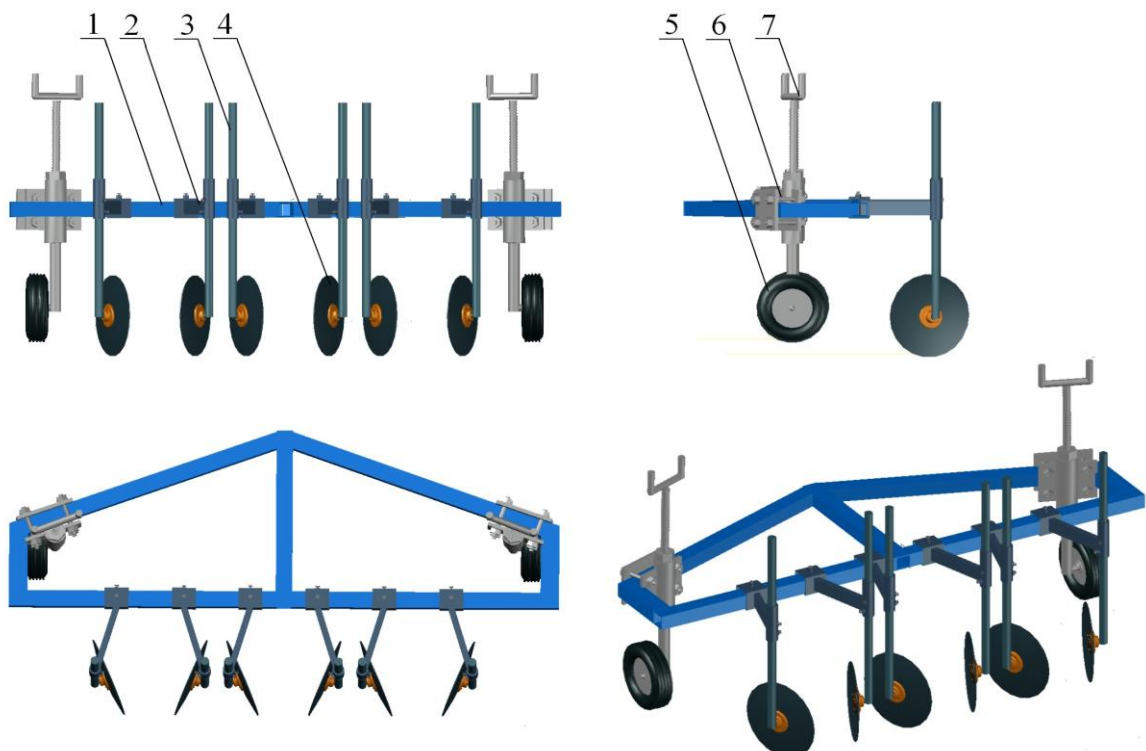


Рис. 4.19. Підгортач для оброблення трьох рядків

Таким чином, у даному підрозділі дисертації представлено деякі побудовані на стадії ескізного проектування комп'ютерні варіантні твердотільні моделі проаналізованих підгортачів. Зазначений матеріал є завершальним для вказаних ґрунтообробних знарядь.

Висновки до розділу 4

У цій частині дослідження, спираючись на викладені у другому і третьому розділах теоретичні засади у вигляді запропонованої концепції, напрацьованого математичного апарату та прийомів автоматизованого геометричного моделювання конструкційно-експлуатаційних параметрів і характеристик ґрунтообробних знарядь здійснено формоутворення дискових підгортачів.

Для цього використано матеріали, опубліковані у виданнях [10, 22, 23, 150], виконаних за участю автора дисертації.

Було отримано наступні нові науково-практичні результати.

1. Аналітично визначено мінімальний кут повороту дисків відносно напрямку руху знаряддя, який виключає взаємодію з ґрунтом їхньої задньої сферичної поверхні в залежності від таких геометричних параметрів, як діаметри дисків та радіуси сфер. Дану закономірність проаналізовано для найбільш розповсюджених на практиці діапазонів указаних величин. Це сприяє підвищенню якості автоматизованого конструювання розглянутих виробів.

2. Розроблено математичний апарат параметричного геометричного моделювання профілів борозни підгортачів у залежності від діаметрів дисків, кутів їхнього встановлення, необхідної ширини міжрядь, певних конструкційно-експлуатаційних особливостей знарядь та глибини обробітку ґрунту. Наведені здобутки, шляхом їхньої реалізації у вигляді належних комп'ютерних програм, забезпечили продуктивну дефініцію раціональних варіантів проєктованих технічних об'єктів.

3. Підтверджено відповідними розрахунками можливість застосування запропонованого у другому розділі методу граничних оцінок впливу профілю

борозни на експлуатаційні енергетичні характеристики ґрунтообробних знарядь під час опрацювання дискових підгортачів, що засвідчило достатньо загальний характер зазначеного теоретичного підходу.

4. Подано конкретні практичні приклади прогнозованого керування профілем борозни підгортачів для різноманітних діаметрів їхніх дисків, радіусів сферичних поверхонь, кутів позиціонування, ширини міжрядь та глибини обробітку. Це обумовило подальше ефективне автоматизоване формоутворення вказаних знарядь на етапі ескізного проєктування.

5. Побудовано комп'ютерні твердотільні моделі підгортачів, розглянуто їхнє варіантне компонування для одночасного обробляння різної кількості рядків з метою адаптації створюваних знарядь до наявних потужностей тракторів. Акцентовано придатність до комплектації багатоманітними дисками, регулювання кутів їхнього встановлення, ширини міжрядь, глибини обробітку ґрунту та врахування висоти рослин, які підгортаються. Усе це демонструє гнучкість конфігурації створеної конструкції, її здатність належним чином брати до уваги наявні аграрні вимоги.

Таким чином, четвертий розділ дисертації містить подані вище науково-практичні результати, яка сприяють покращенню якості проєктування дискових підгортачів.

РОЗДІЛ 5

ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШОГО РОЗВИТКУ ДИСКОВИХ ЗНАРЯДЬ ДЛЯ МЕХАНІЧНОГО ОБРОБІТКУ ҐРУНТУ

Дану частину дослідження присвячено питанням подальшого розвитку дискових ґрунтообробних знарядь. У першому підрозділі висвітлюється актуальність автоматизації на нинішньому історичному етапі існування людства. Другий розглядає деякі аспекти роботизації належних засобів у галузі сільського господарства. Третій підрозділ стосується запропонованого сошника з гнучкою дистанційно-керованою багатоланковою стовбою. В останньому аналізуються напрямки розвитку дискових знарядь для механічного обробітку ґрунту в інших сферах життєдіяльності.

5.1. Актуальність автоматизації в умовах сучасного суспільства

Відомо, що під *автоматизацією* розуміють процеси, спрямовані на виконання певних завдань з бажано мінімальним втручанням людини. Перший її етап, зазвичай, становить *механізація*, мета якої полягає в полегшенні механізмами та машинами фізичної праці людей. Подальшим логічним розвитком є виконання потрібних інтелектуальних дій, наприклад, за допомогою комп'ютерної техніки. Зазначене обумовлено тим, що механізовані процеси, порівнювано із здійснюваними вручну, як правило, характеризуються вищою якістю при більшій продуктивності та меншій собівартості. Стосовно автоматизації розумової діяльності слід акцентувати, що вказана сфера зараз стрімко розширюється в науці, багатьох галузях промисловості, економіці, освіті, медицині, сільському господарстві, побуті і т. д. Окреслений підхід прийнято називати *комп'ютерними інформаційними технологіями*.

Останні забезпечують здійснення складних обчислень; швидкий пошук необхідних відомостей у величезних обсягах різноманітних даних та їхнє передавання на значні відстані; ефективне керування проєктуванням,

виробництвом та експлуатацією промислової продукції; дистанційну освіту; електронні державні, юридичні, банківські послуги тощо. Описані процеси реалізуються відповідними автоматизованими системами, які до свого складу включають технічні, програмні, математичні та інші засоби.

Важливим напрямком автоматизації є *роботизація*, що полягає в застосуванні фізичних пристроїв, які виконують поставлені завдання з мінімальним втручанням людини. При цьому перевагами є такі чинники, як точність, продуктивність, придатність до використання в небезпечних або малодоступних середовищах, ряд інших. Недоліками здатні бути висока вартість, низька надійність, складність технічного обслуговування під час експлуатації та ін. Незважаючи на перераховані вади, як показує нинішній досвід воєнних дій на території України, роботизація досить часто рятує життя людей, що становить найвищу цінність у нашому світі. Тому проведення наукових розвідок і проєктно-конструкторських робіт з означеної тематики варто вважати особливо актуальним завданням на сучасному етапі розвитку нашої держави.

На основі викладеного вище, щодо розглянутих дискових знарядь, які в дисертації подано на прикладі сошників і підгортачів, доречно акцентувати наступне. Питання їхньої механізації може стосуватися заміни болтових кріплень позиціонування дисків гідравлічними пристроями. Для проаналізованих підгортачів це також стосується розташування опорних коліс у горизонтальній площині та гвинтового регулювання висоти розміщення рам. Але, вказаний напрямок виходить за рамки тематики даного наукового дослідження.

Автоматизацію процесів проєктування дискових сошників і підгортачів докладно представлено у трьох попередніх розділах. Було запропоновано належні теоретичні засади, розроблено необхідний математичний апарат, створено відповідні тестові програмні засоби, побудовано комп'ютерні твердотільні моделі конструкції, сформовано практичні рекомендації для оптимізації конструкційно-експлуатаційних геометричних параметрів і характеристик зазначених виробів.

Роботизації присвячено публікації [51, 54, 66–68, 99, 100, 163, 164, 177]. У статті [51] наведено основи створення автономної системи керування рухом наземного роботизованого комплексу на малих дистанціях. Загальний огляд таких комплексів провідних країн світу та України викладено у виданні [54]. Працею [66] акцентується важливість системно-структурного аспекту вибору елементів робототехнічних систем, а дослідженням [67] – використання морфологічних методів при проєктуванні захватних пристроїв. У публікації [68] виконано аналіз розмірних зв'язків роботизованої складальної системи. Монографією [99] систематизовано наявні конструкції роботизованих наземних комплексів, сфер їхнього використання. У статті [100] досліджено лінійні та кутові коливання рухомої платформи таких комплексів. Працею [103] подано полігональний спосіб територіальної кластеризації, який може бути застосовано під час комп'ютерного моделювання складного динамічного руху наземних роботизованих комплексів, а відомості з видання [115] – для дефініції потрібних механічних властивостей ґрунту. Вплив нерівностей останнього на наземні робототехнічні комплекси розглядається в публікації [163]. Визначення динамічних навантажень на ґрунт від них висвітлюється в матеріалах [164]. У статті [177] розглядаються питання математичного моделювання систем автоматичного керування.

У наступному підрозділі дисертації представлено загальний опис сучасного стану, існуючих завдань та перспектив роботизації дискових ґрунтообробних знарядь.

5.2. Роботизація дискових знарядь для механічного обробітку ґрунту в сільському господарстві

Сільське господарство – це важлива сфера життєдіяльності, яка забезпечує потреби людей у якісних продуктах харчування. Прогресивний характер дискових ґрунтообробних знарядь було показано у вступі та першому розділі дисертації. Дана частина дослідження висвітлює нинішній стан, наявні завдання, перспективи розвитку роботизації дискових знарядь для механічного обробітку ґрунту.

Актуальну проблему даної галузі народного господарства становить необхідність підвищення продуктивності виробництва при дотриманні екологічних вимог та економії ресурсів. При традиційному підході ґрунтообробні знаряддя агрегатуються з трактором і керуються людиною. У таких обставинах роботизація повинна спрямовуватися як на зазначену машину, так і на вказані механізми.

Роботизовані трактори можуть застосовувати для навігації GPS (Global Positioning System), тобто систему глобального позиціонування, що являє собою певні радіоелектронні пристрої наземного й космічного базування, за допомогою яких обчислюється положення різноманітних об'єктів у просторі. Це дозволяє транспортному засобу переміщуватися за обраним маршрутом з достатньою точністю. Наведене сприяє виключенню небажаних прогалів або перекриттів оброблюваних ділянок, що не тільки підвищує якість агротехнічних процесів, а й знижує витрати палива, інших ресурсів. За супутниковими знімками та додатковою інформацією з'являється можливість, з метою оптимізації, керувати сільськогосподарським полем не як однорідним об'єктом, а брати до уваги особливості його окремих фрагментів. Існують також ще схожі напрямки розвідок, зокрема, щодо цифровізації польових досліджень, як інформаційної основи для ефективного здійснення управління рослинництвом [29]. Однак зауважимо, що окреслене в даному абзаці значною мірою виходить за рамки тематики дисертації, яка пов'язана тільки з дисковими знаряддями для механічного обробітку ґрунту на прикладі сошників і підгортачів. Тому перейдемо далі до опису перспектив роботизації саме цих засобів.

Головне завдання полягає у гнучкій їхній адаптації до стану ґрунту, тобто до таких його властивостей, як *механічний склад* (піщані та глинисті ґрунти, чорнозем тощо), *структура* (тверда, грудкувата, пухка), *вологість*, *наявність бур'янів і решток попередніх сільськогосподарських культур*, *нерівність рельєфу* і т. д. Шляхом опрацювання зазначеної інформації від належних

датчиків роботизована система в режимі реального часу повинна автоматично змінювати потрібним чином глибину обробітку, кути встановлення дисків, впливати на поточну експлуатаційну швидкість руху тощо. Дотримання бажаної глибини обробітку контролюється ультразвуковими, лазерними та іншими датчиками, які вимірюють відстань від рами знаряддя до землі. У разі відхилень бортовий комп'ютер подає керуючі сигнали виконавчим гідравлічним пристроям, що відповідно піднімають або опускають опорні колеса. Стала глибина обумовлює рівномірність сходів і, як наслідок, подальше підвищення врожайності, а також економію палива за рахунок відсутності зайвих заглиблень. Оптимізація регулювання кутів позиціонування дисків технічно складніше, але за своїм впливом теж доволі ефективне. Контроль за допомогою датчиків сили опору дозволяє встановити наявну щільність ґрунту, а з використанням відеокамер оцінити обсяги рослинних залишків. Це забезпечує оперативне уточнення раціональних величин кутів встановлення дисків знарядь для механічного обробітку ґрунту. Належна адаптація виконується гідравлічними пристроями, які керуються бортовим комп'ютером. Іншими словами, завдяки роботизації з'являється можливість опрацьовувати індивідуально окремі ділянки поля з різними властивостями, чим реалізується оптимізація проаналізованих процесів. Описане вище сприяє підвищенню якості розглянутих аграрних технологій, економії енергетичних ресурсів, дотриманню екологічних вимог. Отже, сучасна роботизація прагне перетворити традиційні механічні дискові засоби на інтелектуальні механічно-електрично-електронні пристрої з комп'ютерним керуванням.

Таким чином, роботизація дискових знарядь для обробітку ґрунту в сільському господарстві стосується автоматизації тракторів та їхнього причіпно-навісного обладнання. В останньому випадку зазначені засоби вже не просто переміщуються рушіями у вигляді пасивних об'єктів, а постають саморегульованими технічними системами, які, з метою оптимізації певних параметрів та характеристик, гнучко адаптуються до існуючих експлуатаційних умов.

На завершення підрозділу зауважимо, що одним із найважливіших нині аспектів роботизації сільськогосподарських ґрунтообробних знарядь в умовах України, незважаючи на відносно високу вартість відповідного обладнання, є реалізація вказаними засобами безпечної для здоров'я людей праці на полях, засмічених вибуховими предметами внаслідок воєнних дій.

На підставі проаналізованої інформації далі представлено запропонований дводисковий сошник із гнучкою дистанційно-керованою багатоланковою стовбою (стояком).

5.3. Дводисковий сошник із гнучкою дистанційно-керованою багатоланковою стовбою

Ця частина дослідження до свого складу включає два пункти. У першому подано опис застосування структурно-параметричної методології для геометричного моделювання дистанційно керованого гнучкого маніпулятора, як складової роботизованих систем. Цей пристрій розроблено за участю автора дисертації та захищеного патентом України на винахід [16]. Другий пункт присвячено дводисковому сошнику з гнучкою дистанційно-керованою багатоланковою стовбою, створеною на основі вказаного патенту та отриманого патенту на корисну модель [32].

5.3.1. Гнучкий маніпулятор з дистанційним керуванням

Як уже акцентувалось вище, зараз у житті людей усе більш популярними стають багатоманітні роботизовані системи. Маються на увазі різні галузі промисловості, сільськогосподарське виробництво, військова діяльність, рятувальні операції, медицина, побут і т. д. Ці технічні засоби значно підвищують продуктивність виконуваних операцій у порівнянні з неавтоматизованою формою їхньої реалізації, продуктивно здійснюють високоточні роботи та контролюють якість продукції, успішно функціонують у небезпечних середовищах тощо.

Важливими складовими роботизованих систем є маніпулятори, які здійснюють взаємодію з опрацьовуваними об'єктами. Нині доволі

розповсюджені відповідні електромеханічні пристрої шарнірного типу. Їхня кінематика має електричний привід, а структура становить послідовно з'єднані шарнірами ланки. Нижче розглянуто такий розроблений гнучкий маніпулятор з дистанційно-керованими елементами.

Дана конструкція містить основу, декілька однотипних діелектричних ланок, тобто сегментів, та робочий орган. Зазначені компоненти з'єднуються металевим тросом, який добре проводить електричний струм. Позиціонування сегментів у просторі виконується шляхом дистанційного керування. Робочі органи можуть бути різноманітного призначення і пристосовані для утримування необхідних предметів, їх переміщення, потрібного розташування, здійснення певних операцій тощо. Будова зазначених пристроїв теж різна. Вони придатні до комплектування як стаціонарних, так і мобільних роботизованих систем. Джерела живлення останніх розміщуються на належних рухомих платформах.

Засоби комп'ютерного моделювання забезпечують проведення ефективного аналізу великого числа проєктних різновидів промислової продукції, дозволяють визначати серед них оптимальний. Для окреслених завдань продуктивним є застосування структурно-параметричного підходу. Його використання для опрацювання гнучкого маніпулятора подається далі. Також розглянуто перспективи останнього у сфері сільського господарства на прикладі дискових знарядь для механічного обробітку ґрунту, що реалізовано в наступному пункті дисертації. Зазначений напрямок актуальний для України, коли через воєнні дії на території нашої держави на значній кількості аграрних полів наявне велике число небезпечних вибухових предметів. В акцентованому випадку рухомі наземні роботизовані системи суттєво підвищують рівень охорони праці людей.

Запропонований маніпулятор показано на рис. 5.1. Основними компонентами його конструкції є основа 1, типовий діелектричний сегмент 2 та робочий орган 3, які з'єднані між собою електропровідним тросом, розташованим усередині пристрою.

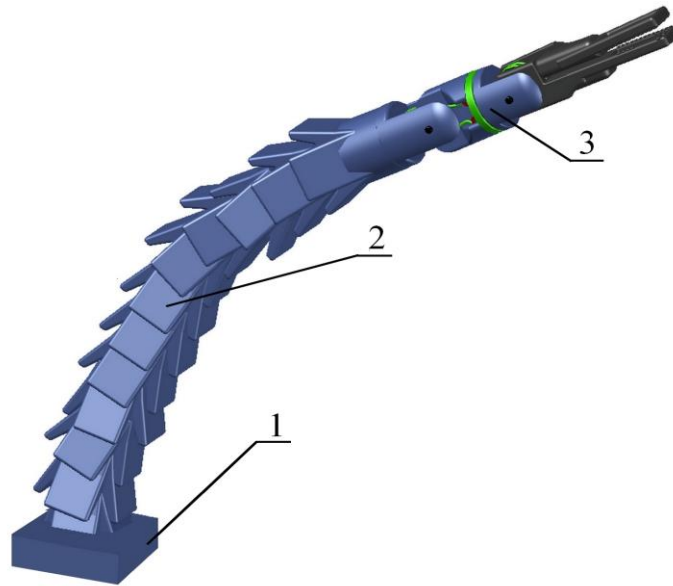


Рис. 5.1. Маніпулятор:

1 – основа; 2 – сегмент; 3 – робочий орган

Згідно зі структурно-параметричним підходом склад проєктованого гнучкого маніпулятора $ГМ$ подається множиною

$$ГМ = (ГМ_i)_{i=1}^{N_{КГМ}} = (ГМ_i)_{i=1}^3 = (ОСН, СЕГ, РО), \quad (5.1)$$

де варіанти структурних елементів:

$$ГМ_1 = ОСН = (ОСН_j)_{j=1}^{N_{ОСН}} = (ОСН_j)_{j=1}^2 \quad (5.2)$$

основ $ОСН$;

$$ГМ_2 = СЕГ = (СЕГ_j)_{j=1}^{N_{СЕГ}} = (СЕГ_j)_{j=1}^3 \quad (5.3)$$

сегментів $СЕГ$;

$$ГМ_3 = РО = (РО_j)_{j=1}^{N_{РО}} = (РО_j)_{j=1}^4 = (ЗАХ_1, ЗАХ_2, PI_1, PI_2) \quad (5.4)$$

робочих органів $РО$.

З виразу (5.1) видно, що перший рівень декомпозиції об'єкта $ГМ$ містить множину з трьома елементами. На другому рівні для основ $ОСН$ маємо два різновиди, для сегментів $СЕГ$ та робочих органів $РО$ – три та чотири. У даному випадку обрана невелика кількість можливих варіантів обумовлена ілюстративним характером цього прикладу.

На рис. 5.2 зображено два різновиди структурних елементів (5.2). Ці об'єкти здатні мати різні параметричні розміри, зокрема, габаритні, діаметри отворів та розташування останніх, радіуси сферичних поверхонь тощо.

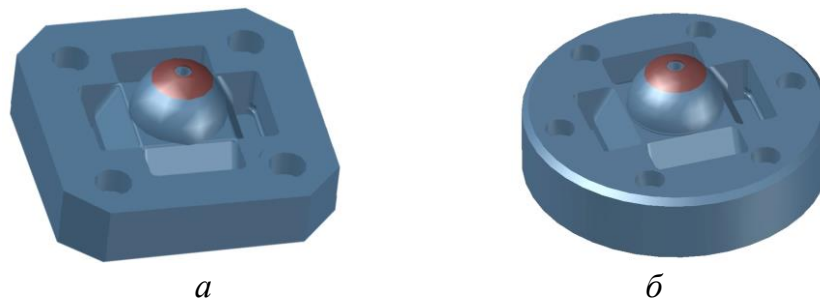


Рис. 5.2. Варіанти основ маніпулятора:

a – призматична OCH_1 ; *b* – циліндрична OCH_2

Рис. 5.3 містить приклад структурного елемента $CE\Gamma_1$, до складових якого відноситься чашкоподібний діелектричний корпус 1 із внутрішньою й зовнішньою сферичними поверхнями та чотири металеві пластини 2 на внутрішній стороні кожного пелюстка та електромагніти 3 на зовнішній. Сферичні контакти 4 і 5 під'єднані до позитивного полюса електричного живлення, а металевий трос, який проходить через отвори 6, з'єднаний з негативним полюсом.

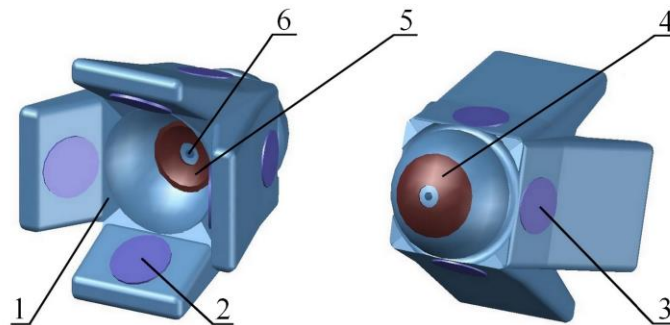


Рис. 5.3. Конструкція сегмента $CE\Gamma_1$:

1 – корпус; 2 – металева пластина; 3 – електромагніт;
4, 5 – зовнішній і внутрішній сферичні контакти; 6 – отвір для тросу

Наведені у формулі (5.3) структурні елементи $CE\Gamma_2$ та $CE\Gamma_3$ схожі, але мають відповідно шість і вісім пелюстків. Зростання їхнього числа покращує точність позиціонування маніпулятора. При його розташуванні на мобільному роботизованому комплексі джерело живлення розміщується на відповідній рухомій платформі.

Розріз корпусу сегмента площиною його симетрії зображено на рис. 5.4. У середині знаходиться система керування, що містить блок живлення (БЖ), чотири мікроконтролери (МК), мікропроцесор (МП) та модуля бездротового зв'язку (МБЗ). Згідно з сигналами останнього МП здійснює керування МК. Через трос 6 і сферичні контакти 4 та 5 подається електричний струм для системи керування. Зазначимо, що позиції 1 ... 5 однакові з рис. 5.3.

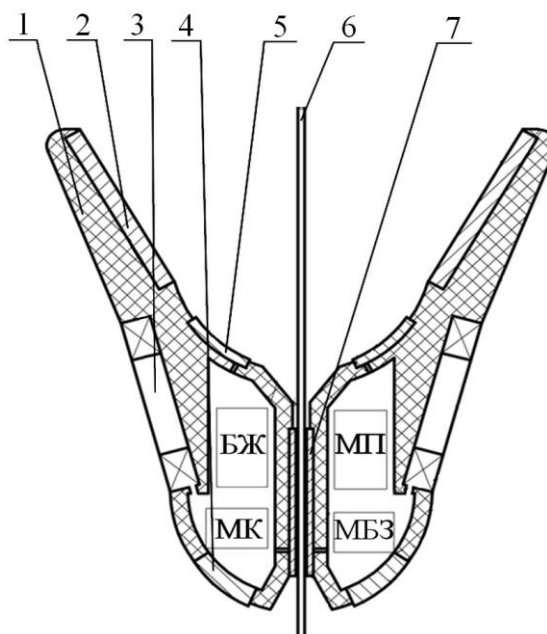
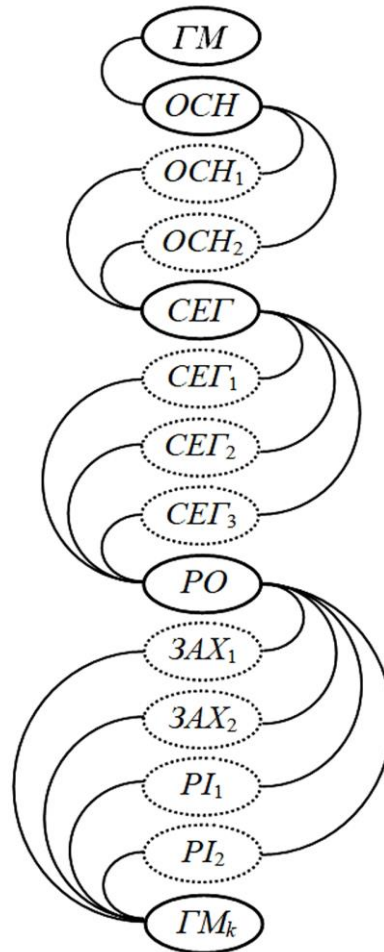


Рис. 5.4. Система керування сегмента $СИГ_1$:

1 – корпус; 2 – металева пластина; 3 – електромагніт;
4, 5 – сферичні контакти; 6 – трос; 7 – втулка

Конкретне число проаналізованих вище сегментів у гнучкому маніпуляторі визначається на підставі врахування існуючих потреб. Подібно до основ, для формоутворення цих пристроїв використовуються параметричні розміри. Елементами множини (5.4) є $ЗАХ_1$, $ЗАХ_2$ (різновиди захватів) та PI_1 , PI_2 (варіанти робочих інструментів, наприклад, зварювальний електрод і свердло).

Рис. 5.5 містить СПГМ, яка визначає розглянутий дистанційно-керований гнучкий маніпулятор та реалізує його ефективне комп'ютерне проєктування з метою синтезу варіантів та їх належної комплексної оптимізації. Застосовувані для цього методи, способи, прийоми та алгоритми викладені, зокрема, в дослідженні [14].

Рис. 5.5. СПГМ маніпулятора GM

Основою для показаної моделі є структурні елементи множин (5.1) ... (5.4). Це забезпечує одержання необхідних різновидів проєктованого гнучкого маніпулятора

$$GM = (GM_k)_{k=1}^{N_{BGM}}, \quad (5.5)$$

де N_{BGM} – їхнє число.

Описаному випадку у виразі (5.5) відповідає значення

$$N_{BGM} = N_{OCH} \cdot N_{CEG} \cdot N_{PO} = 2 \cdot 3 \cdot 4 = 24. \quad (5.6)$$

Коли ж не всі структурні елементи (5.1) ... (5.4) можуть взаємодіяти між собою, що відтворюється матрицею суміжності СПГМ, то число структурних варіантів (5.6) буде меншою. При цьому кожен різновид (5.5) визначається вектором параметрів

$$P_{GM_k} = (P_{GM_{km}})_{m=1}^{N_{GMk}}.$$

Отже, в даному пункті дисертації подано запропоновану методику застосування структурно-параметричної методології для геометричного моделювання гнучкого маніпулятора з дистанційним керуванням. Уже акцентувалося, що він придатний для використання як у стаціонарних, так і рухомих роботизованих системах. Останнє стосується, зокрема, сільсько-господарських дискових знарядь для механічного обробітку ґрунту. Такий приклад наведено далі.

5.3.2. Сошник із гнучкою дистанційно-керованою стовбою

Для механічного обробітку ґрунту в сільському господарстві наявна значна номенклатура дискових знарядь. Наведене обумовлено метою отримання високих агротехнічних показників в обставинах великого розмаїття існуючих властивостей ґрунтів стосовно можливого їхнього складу (чорнозем, піщані, глинисті тощо), структури (пухкі, тверді і т. д.), інших характеристик (вологість, попередні вирощувані культури тощо). Пристосування до наведених ситуацій як правило реалізується необхідною конструкцією робочих органів та раціональними режимами їхньої експлуатації. У першому випадку це певна форма, розміри й матеріал знарядь, а у другому – глибина та швидкість обробітку ґрунту, потрібне позиціонування дисків. Останнє в сучасних аграрних машинах, зазвичай, здійснюється механічним чином з фіксацією розташувань робочих органів для всього вказаного процесу.

Більш прогресивним використанням проаналізованих сільсько-господарських засобів є застосування їх у складі належних роботизованих комплексів з основою у вигляді подібного до розглянутого вище маніпулятора з дистанційним керуванням. Отримувана перевага полягає в забезпеченні при експлуатації гнучкого керування позиціонуванням ґрунтообробних органів відповідно до наявних умов у режимі реального часу. Це не тільки підвищує аграрні показники, а і сприяє економії витрат енергії та живої праці людей. Важливим фактором є також забезпечувана уніфікація, тобто зменшення потрібної номенклатури необхідних дискових сільськогосподарських знарядь

унаслідок виконаної зазначеної адаптації. Проте головний здобуток становить збереження життя і здоров'я аграрних працівників при роботі на засмічених різноманітними вибуховими предметами полях через воєнні на території України.

На основі поданого в попередньому пункті гнучкого маніпулятора та викладеного у другому і третьому розділах належного математичного апарату для універсальних сошників розроблено концептуальну конструкцію з гнучкою дистанційно-керованою багатоланковою стовбою (рис. 5.6).

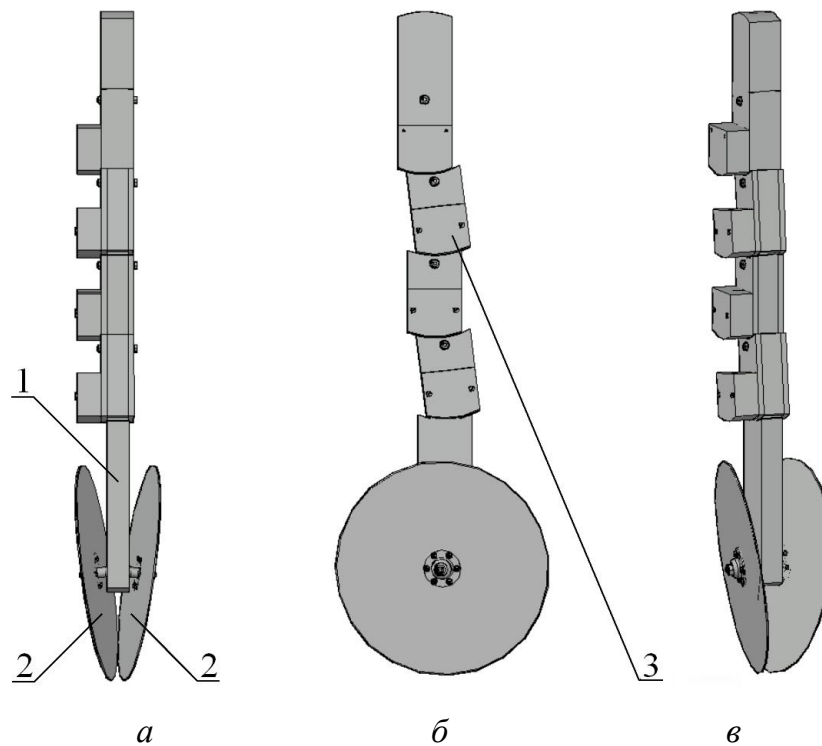


Рис. 5.6. Дводисковий сошник із гнучкою дистанційно-керованою стовбою, види:

а – за напрямом руху знаряддя; *б* – з лівого боку; *в* – аксонометричний

1 – стояк з осями; 2 – диск із матчиною та вальницею; 3 – багатоланкова стовба

Традиційний стояк (див. рис 2.1 *а*) не забезпечує змінювання утворюваного профілю борозни залежно від наявних умов і потреб, оскільки не має засобів варіювання кутів встановлення дисків. Запропоновану відповідну адаптацію за допомогою регулювального кронштейна представлено на рис. 2.1 *б*. Зауважимо, що наведені там дискретні обмеження стосуються тільки конкретної конструкційної реалізації, а не напрацьованого інваріантного до цього математичного апарату.

Показана на рис. 5.6 стоба реалізує більшу гнучкість (див. рис. 5.7) особливо зі зростанням числа її ланок, тобто рухомих елементів.

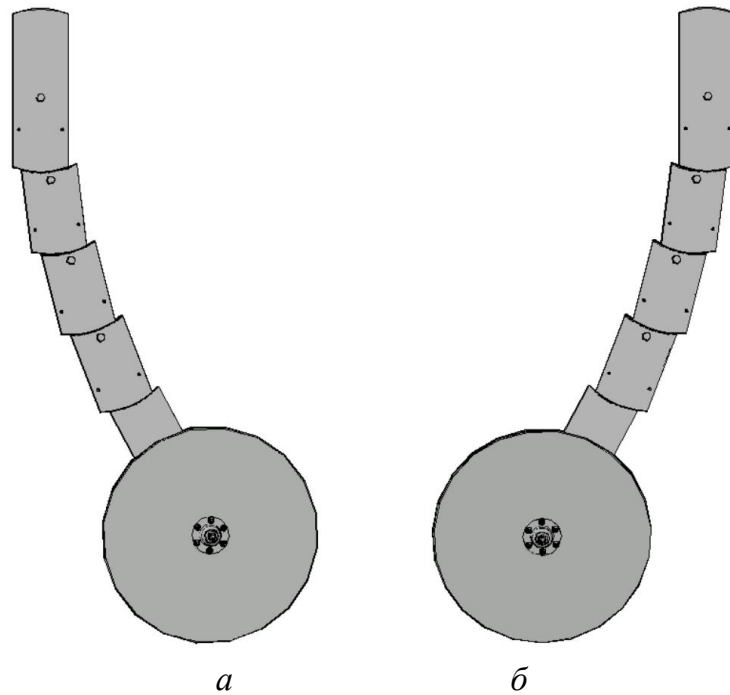


Рис. 5.7. Вид на сошник із правого боку (рух знаряддя зліва направо), відхилення стовби:

a – проти годинника; *б* – за годинником

Схематичний кресленик такої типової ланки наведено на рис. 5.8.

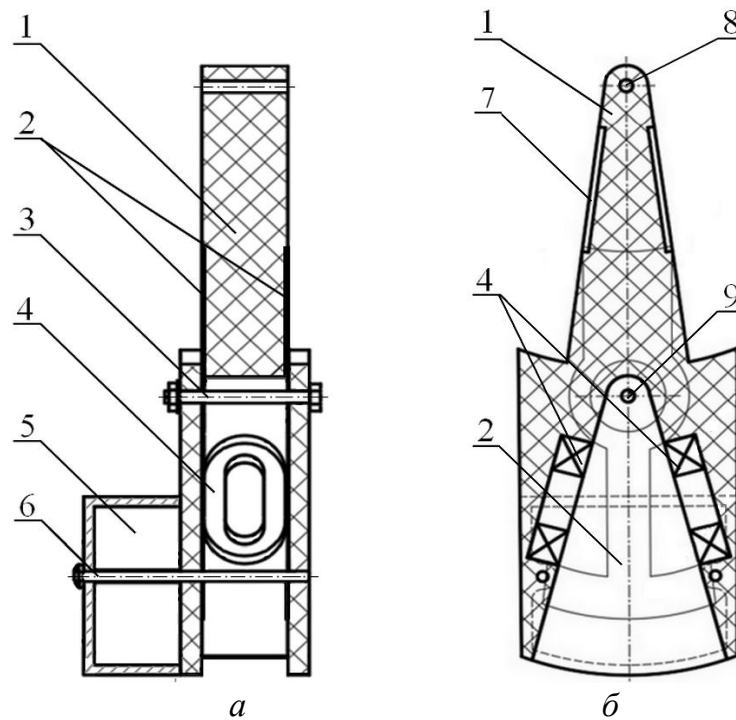


Рис. 5.8. Розрізи рухомого елемента паралельно площині зображення:

a – рис. 5.6 *a*; *б* – рис. 5.6 *б*

На ньому наступними позиціями позначено: 1 – діелектричний корпус; 2 – контактні пластини; 3 – вісь обертання (болт із гайкою та шайбою); 4 – електромагніти; 5 – блок керування; 6 – кріпильний гвинт; 7 – металеві пластини; 8, 9 – отвори для з'єднання рухомих елементів стовби.

Процес функціонування гнучкої багатоланкової дистанційно-керованої стовби ілюструє рис. 5.9.

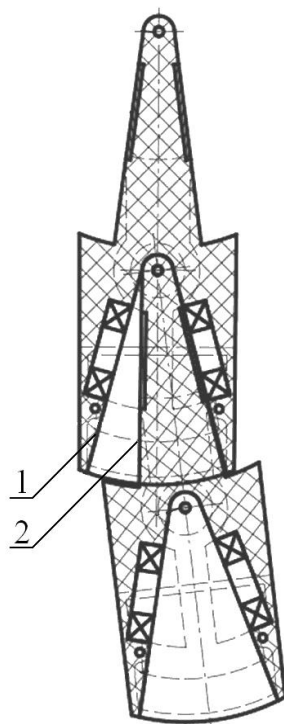


Рис. 5.9. Поєднання та відхилення рухомих ланок стовби:

1, 2 – поверхні, що сполучаються

На ньому показано відхилення проти годинникової стрілки, здійснене шляхом обертання навколо належної осі нижнього рухомого сегмента, реалізоване сполученням його поверхні з відповідною поверхнею верхньої ланки. Аналогічним чином виконується поворот цього сегмента за годинниковою стрілкою поєднанням поверхонь 1 і 2.

Описаний процес відбувається наступним чином (див. рис. 5.8). Живлення всіх послідовно з'єднаних ланок забезпечують взаємодією контактних пластин 2, попереднього і наступного елементів. У якості джерела живлення гнучкої стовби може бути генератор електричного струму або акумулятор. З використанням Wi-Fi або Bluetooth системи за допомогою модуля бездротового

зв'язку, передбаченого в блоці керування 5, та бездротової мережі передачі даних кожен рухомий елемент приєднують до комп'ютера або іншого електронно-цифрового приладу з необхідним програмним забезпеченням. На кожен таку ланку гнучкої стовби передається належний керуючий сигнал до мікропроцесора у блоці керування, а потім до одного з мікроконтролерів, який активує з'єднаний з ним електромагніт 4. Останній притягує до себе металеву пластину 7, розташовану навпроти нього на поверхні суміжного рухомого елемента, за рахунок чого відбувається потрібний вигин стовби.

Число розглянутих елементів в ланцюзі гнучкої стовби, їхні розміри, інші характеристики залежать від конкретних агротехнічних операцій та умов експлуатації. З рис. 5.7 видно, що відхилення стовби впливає на отримуваний профіль борозни. Це важливо для його адаптації, зокрема, для висіву різного за величиною насіння, наприклад, ячменю або кукурудзи. Зауважимо, що джерело живлення й електромагніти обирають, виходячи з розмірів, кількості та ваги рухомих елементів стовби. Застосування технологій 3D-друку дозволяє виготовляти їхні корпуси з великої номенклатури технологічно придатних матеріалів.

Як видно з викладеного вище, один рухомий елемент забезпечує два відхилення ланки стовби. Тоді, при наявності n_{pe} таких елементів, загальне число можливих позицій гнучкої стовби становить

$$n_{noz} = 2^{n_{pe}}. \quad (5.7)$$

На підставі виразу (5.7) для конкретних значень маємо

$$\begin{aligned} n_{pe} = 1, n_{noz} = 2; \quad n_{pe} = 2, n_{noz} = 4; \quad n_{pe} = 3, n_{noz} = 8; \quad n_{pe} = 4, n_{noz} = 16; \\ n_{pe} = 5, n_{noz} = 32; \quad n_{pe} = 6, n_{noz} = 64; \quad n_{pe} = 7, n_{noz} = 128; \quad n_{pe} = 8, n_{noz} = 256. \end{aligned} \quad (5.8)$$

Дані (5.8) свідчать про стрімке зростання кількості позицій і розширення діапазону вигинання стовби при збільшенні числа її рухомих елементів. Акцентуємо також те, що останні мають V-подібну форму взаємодіючих

поверхонь. За потреби вказані ланки можуть застосовуватися не тільки з однаковою, а й різною величиною кута відхилення. Це дозволяє підвищувати точність розташування ґрунтообробних дисків.

Таким чином, до переваг запропонованої багатоланкової стовби з дистанційним керуванням відноситься, зокрема: гнучке регулювання кутів встановлення дисків, що забезпечує отримання бажаної борозни та, як наслідок, позитивно впливає на покращення врожайності сільськогосподарських культур; придатність до експлуатації на забруднених через воєнні дії вибуховими предметами полях, що сприяє охороні праці робітників. Наявні ризики пов'язані зі зростанням вартості розглянутих знарядь і підвищенням складності їхнього технічного обслуговування.

5.4. Напрямки розвитку дискових ґрунтообробних знарядь в інших галузях життєдіяльності

Як уже зазначалось, найпоширенішою сферою для використання дискових знарядь для механічного обробітку ґрунту є сільське господарство, що й було опрацьовано в матеріалах даного наукового дослідження. Але, завдяки своїм корисним властивостям, проаналізовані засоби застосовуються також і в інших галузях життєдіяльності людей.

У лісовому господарстві за допомогою дискових знарядь розпушують і подрібнюють ґрунт перед висаджуванням дерев для покращення аерації та водопроникнення, що сприяє приживанню саджанців; розрівнюють ділянки після вирубання лісу; формують протипожежні смуги, які перешкоджають поширенню вогню. Останнє стосується не тільки лісових насаджень, а й багатьох посушливих степових районів. У будівництві вказані механізми відіграють певну роль під час прокладання доріг або їхньої реконструкції, облаштування виробничих майданчиків. Дискові знаряддя для механічного обробітку ґрунту використовуються також і у воєнній сфері для підготовки бойових позицій, іншого інженерного забезпечення, мінування й розмінування тощо, але в модифікованому вигляді. Мається на увазі суттєве посилення

конструкцій, відповідна заміна матеріалів і т. п. Технічні засоби, що розглядаються, використовуються на державному кордоні для створення контрольних смуг, на яких зручно фіксуються сліди порушників. Це ж стосується подібних утворень навколо певних важливих об'єктів, які охороняються або є небезпечними, наприклад, воєнних полігонів, складів боєприпасів, інфраструктурних будівель і споруд тощо. Такі заходи забезпечують не тільки виявлення небажаного проникнення чи попередження про можливу загрозу, а і створюють необхідні перешкоди для розповсюдження вогню при пожежі. Дискові знаряддя для механічного обробітку ґрунту використовуються при розмежуванні земельних паїв, мисливських угідь, інших господарських ділянок. Має місце їхнє застосування в ландшафтному дизайні при вирівнюванні й розпушуванні ґрунту перед укладанням дерну, посівом трави або виконанням іншого озеленення та при облаштуванні спортивних майданчиків, зокрема футбольних полів, де необхідно мати достатньо рівну плоску поверхню. Можливі також інші, не наведені вище сфери ефективного вжитку дискових ґрунтообробних знарядь, але це виходить за рамки тематики дисертаційного дослідження.

На завершення підрозділу акцентуємо, що головними перевагами дискових знарядь для механічного обробітку ґрунту, які обумовили доволі широку сферу їхнього використання на практиці є висока продуктивність, простота конструкції та експлуатації, низькі витрати енергетичних ресурсів при функціонуванні, здатність гнучко адаптуватись до наявних різноманітних умов, можливість здійснення автоматизації виконуваних процесів. Комплексній оптимізації зазначених факторів певним чином сприяють напрацювання, здійснені в даних наукових розвідках. Зокрема, це стосується: узагальненої моделі комп'ютерного формоутворення робочих поверхонь дисків; методу граничних оцінок впливу профілю борозни на експлуатаційні енергетичні характеристики ґрунтообробних знарядь; способу керування отримуваним профілем борозни за допомогою кутів позиціонування дисків на основі встановлених відповідних аналітичних залежностей; концептуальної

конструкції універсальних сошників, пристосованих для здійснення звичайної та вузькорядної сівби; методики оптимізації конструкційно-експлуатаційних геометричних параметрів і характеристик дискових знарядь шляхом визначення найбільш раціональної їхньої конфігурації для певних умов; запропонованої роботизації сошників. Наведені здобутки здатні забезпечити певний подальший розвиток дискових ґрунтообробних знарядь в інших, ніж сільське господарство, галузях життєдіяльності.

Висновки до розділу 5

У даній частині дисертації опрацьовано питання перспектив дискових знарядь для механічного обробітку ґрунту. Було показано актуальність автоматизації різноманітних процесів на сучасному етапі розвитку суспільства, зокрема роботизації вказаних технічних засобів. Викладено загальні належні теоретичні міркування, наведено конкретний відповідний приклад автоматизованого сошника з гнучкою дистанційно-керованою багатоланковою стовбою. Проаналізовано інші, ніж сільське господарство сфери діяльності людей, де застосовуються дискові ґрунтообробні знаряддя. Показано можливість їхнього вдосконалення на основі отриманих здобутків проведеного наукового дослідження.

Викладені відомості опубліковано у працях [16, 24, 25, 29, 32, 33, 38], виконаних за участю автора дисертації.

Отримано наступні нові науково-практичні результати.

1. Показано актуальність на нинішньому етапі розвитку нашої держави здійснення автоматизації аграрних процесів із використанням дискових знарядь для механічного обробітку ґрунту. Це обумовлено не тільки метою покращення якості вказаних технологій, а й бажанням реалізації безпеки праці сільськогосподарських робітників при наявних на полях вибухових предметах унаслідок воєнних дій на території України.

2. Розроблено універсальний гнучкий маніпулятор з дистанційним керуванням, який придатний для застосування в різних сферах життєдіяльності,

зокрема промисловості, сільському господарстві, медицині, побуті, при проведенні рятувальних операцій, функціонуванні в небезпечних середовищах тощо. Цей засіб дозволяє підвищувати продуктивність праці та якість виконуваних робіт. На зазначений гнучкий маніпулятор з дистанційним керуванням отримано патент на винахід (див. підрозділ А.4 додатків).

3. Розроблено гнучку дистанційно-керовану багатоланкову стовбу дводискового сошника, авторське право на яку засвідчує наведений у підрозділі А.4 додатків патент на корисну модель. Запропонований підхід дозволяє ефективно адаптуватись до існуючих аграрних умов шляхом обрання потрібного позиціонування робочих поверхонь, що реалізує необхідний профіль борозни і, як наслідок, сприяє покращенню врожайності вирощуваних культур. Перевага описаного роботизованого пристрою полягає також у підвищенні безпеки праці на полях, засмічених вибуховими речовинами.

4. Окреслено напрямки розвитку дискових знарядь для механічного обробітку ґрунту в інших, ніж сільське господарство, галузях життєдіяльності людей. Це визначає тематику можливих відповідних подальших наукових розвідок.

Таким чином, п'ятий розділ дисертації, що є завершальним у даному дослідженні, присвячено перспективам проаналізованих ґрунтообробних знарядь. Акцентовані аспекти спираються на такі їхні переваги, як висока продуктивність, простота конструкції та експлуатації, низькі витрати енергетичних ресурсів при функціонуванні, здатність гнучко адаптуватись до наявних умов, можливість здійснення автоматизації виконуваних процесів.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Дисертаційну роботу присвячено вирішенню актуальних питань підвищення якості автоматизованого проєктування технічних об'єктів на прикладі формоутворення дискових знарядь для механічного обробітку ґрунту.

Значення для науки полягає в запропонованому підході інтегрованого моделювання конструкційно-експлуатаційних геометричних параметрів і характеристик дискових ґрунтообробних знарядь на засадах методології структурно-параметричного формоутворення.

Значення для практики мають наведені рекомендації, побудовані математичні та комп'ютерні моделі дискових сошників і підгортачів, що забезпечують їхню гнучку адаптацію до різноманітних наявних умов, сприяють підвищенню врожайності сільськогосподарських культур, зменшенню витрат енергетичних та інших ресурсів.

У процесі виконання поставлених завдань отримано наступні результати, що мають теоретичну і практичну цінність.

1. Проаналізовано нинішній стан проєктування сільськогосподарських ґрунтообробних знарядь. Показано, що серед них дискові є найперспективнішими з точки зору економічності та дотримання існуючих екологічних вимог. Зазначене обумовило їхнє обрання для проведення належних наукових досліджень. Літературні джерела засвідчили, що зараз доволі популярний мінімальний, тобто без оранки, обробіток землі під час якого поєднуються такі технологічні аграрні операції, як формування потрібної борозни та внесення до неї добрив і насіння. Це здійснюється сошниками, серед яких більш досконалі дводискові. Тому головну увагу спрямовано саме на них та дискові підгортачі. Останнє дозволяє охопити механічний обробіток ґрунту не тільки на стадії посіву, а й догляду за рослинами.

2. Обґрунтовано доцільність використання інтегрованого підходу до моделювання конструкційно-експлуатаційних геометричних параметрів та

характеристик дискових знарядь для механічного обробітку ґрунту на засадах методології структурно-параметричного формоутворення. Це спричинено тісним зв'язком між конструкційними та експлуатаційними геометричними параметрами й характеристиками дискових знарядь для механічного обробітку ґрунту. Зокрема, стосується діаметрів і кутів встановлення дисків, глибини обробітку, отримуваного профілю борозни, енергетичних витрат і т. д.

3. Наведені факти обумовили актуальність докладного опрацювання вказаних питань шляхом розроблення математичного апарату інтегрованого варіантного моделювання конструкційно-експлуатаційних геометричних параметрів і характеристик дискових сошників та підгортачів, що послугувало загальною теоретичною основою для даних дисертаційних досліджень.

4. Розроблено спосіб керування профілем борозни за допомогою кутів позиціонування дисків на основі встановлених відповідних аналітичних залежностей, що пов'язують між собою також діаметри дисків та глибину обробітку ґрунту. Це дозволяє прогнозовано визначати їхні раціональні величини під час проектування.

5. Напрацьовано концептуальну конструкцію універсальних дводискових сошників, пристосованих для здійснення як звичайної, так і вузькорядної сівби. Наведений підхід забезпечив дефініцію раціональних кутів встановлення дисків відносно трьох ортогональних осей, дві з них належать площині симетрії знаряддя, а третя має довільне розташування у просторі. Зазначені особливості сприяють пристосуванню даного виробу до різноманітних умов його експлуатації.

6. Розроблено конструкцію дводискового сошника з гнучкою багатоланковою стовбою у вигляді роботизованої системи з дистанційно-керованими елементами. Запропонований підхід дозволяє ефективно адаптуватись до існуючих умов обранням потрібного позиціонування робочих поверхонь, що реалізує необхідний профіль борозни і, як наслідок, сприяє покращенню врожайності вирощуваних культур. Перевага вказаного

роботизованого пристрою полягає також у підвищенні безпеки праці на полях, засмічених вибухонебезпечними предметами внаслідок воєнних дій на території України.

7. Розроблено метод граничних оцінок впливу профілю борозни на експлуатаційні енергетичні характеристики ґрунтообробних знарядь, який проілюстровано на прикладі дводискових сошників. Це дозволяє на підставі аналітичних залежностей кількісно оцінювати ефективність використання відповідних ресурсів.

8. Удосконалено теорію автоматизованого варіантного проєктування виробів машинобудування запропонованими інтегрованими конструкційно-експлуатаційними геометричними моделями дискових знарядь для механічного обробітку ґрунту.

9. Упроваджено отримані наукові результати виконаного дисертаційного дослідження:

- у фермерському господарстві «Росток» Кіровоградської області Уляновського району Кам'янобрідської сільської ради при проведенні лабораторно-польових експериментальних досліджень. Було вдосконалено конструкцію стовби сошника сівалки, яке полягає в можливості гнучкого налаштування потрібної глибини та ширини посівної борозни, кута нахилу її бокових стінок відповідно до розмірів насіння. Це дозволило здійснювати якісний висів різного за розмірами насіння ячменю й кукурудзи без додаткових, передбачених заводськими інструкціями налаштувань;

- у навчальний процес Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» у вигляді методик автоматизованого варіантного моделювання технічних об'єктів машинобудування під час викладання дисципліни «Інженерна та комп'ютерна графіка».

10. Визначено напрямки подальшого розвитку запропонованого підходу до моделювання конструкційно-експлуатаційних геометричних параметрів і характеристик дискових знарядь для механічного обробітку ґрунту не тільки в сільському господарстві, а й інших галузях життєдіяльності.

Таким чином, головними здобутками виконаної дисертаційної роботи є напрацювання нової концепції комп'ютерного варіантного геометричного моделювання дискових знарядь для механічного обробітку ґрунту, відповідного математичного апарату та моделей, які гнучко поєднують конструкційні та експлуатаційні параметри й характеристики зазначених технічних об'єктів з метою їхньої оптимізації. Зазначені здобутки сприяють не тільки підвищенню якості автоматизованого проєктування розглянутої промислової продукції, а й практичного її використання.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Адамчук, В. В., Булгаков, В. М., Надикто, В. Т., Кувачов, В. П., Ігнат'єв, Є. І., & Ольт, Ю. (2021). Теорія стійкого руху дискової борони. *Механізація та електрифікація сільського господарства*, 14, 10–22. URL: <https://doi.org/10.37204/0131-2189-2021-14-1>
2. Анікєєв, О. І., Сировицький, К. Г., Агапов, М. О., & Бойко А. О. (2019). Методика обґрунтування раціонального складу і швидкісного режиму роботи машинних агрегатів. *Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів*, 18, 62–69. URL: <http://doi.org/10.37700/ts.2019.18.62-69>
3. Артюх, О. М., Дударенко, О. В., Кузьмін, В. В., Сосик, А. Ю., & Щербина, А. В. (2021). Дослідження та випробування технічних систем. Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 212 с.
4. Артюх, О. М., Дударенко, О. В., Кузьмін, В. В., Сосик, А. Ю., & Щербина, А. В. (2021). Основи мехатроніки. Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 372 с.
5. Беседа, О. О., & Маслійов, С. В. (2014). Сільськогосподарські машини. Частина І. Ґрунтообробні, посівні та садильні машини. Луганськ: ТОВ «Віртуальна реальність», 188 с.
6. Блага, Н. В. (2021). Управління проєктами. Львів: ЛДУВС, 152 с.
7. Бондаренко, С. Г., & Космач, О. П. (2020). Основи системної технології життєвого циклу машин. Ч. 1: Системність та створення виробу. Чернігів: НУ «Чернігівська політехніка», 262 с.
8. Бончик, В. С., Дуганець, В. І., & Вольський В. А. (2023). Дослідження параметрів профілю картопляної грядки та бульбоносного ложа в умовах слабовилугованого чорнозему. *Механіка та автоматика агропромислового виробництва*, 3, 126–133. URL: <https://doi.org/10.37204/2786-7765-2023-3-12>
9. Буреннікова, Н. В., Зелінська, О. В., Ушкаленко, І. М., & Буренніков, Ю. Ю. (2019). Оптимізаційні методи та моделі. Вінниця: ВНТУ, 121 с.
10. Ванін, В. В., Вірченко, Г. А., Волоха, М. П., Яблонський, П. М., & Воробйов, О. М. (2022). До питання комп'ютерного геометричного

модельовання ґрунтообробних знарядь засобами структурно-параметричного формоутворення. *Прикладна геометрія та інженерна графіка*, 103, 16–22. URL: <https://doi.org/10.32347/0131-579X.2022.103.16-22>

11. Ванін, В. В., Вірченко, Г. А., Волоха, М. П., Яблонський, П. М., & Воробйов, О. М. (2023). Вплив геометричних параметрів стрілкової лапи на енергетичні показники комбінованого культиватора-сошника. *Прикладна геометрія та інженерна графіка*, 104, 30–37. URL: <https://doi.org/10.32347/0131-579X.2023.104.30-37>

12. Ванін, В. В., Вірченко, Г. А., Волоха, М. П., Яблонський, П. М., Воробйов, О. М., & Лазарчук-Воробйова, Ю. В. (2023). Удосконалення конструкції комбінованого лапового культиватора-сошника. *Збірник доповідей XII міжнародної науково-практичної конференції «Прикладна геометрія, інженерна графіка та об'єкти інтелектуальної власності»* (с. 4–7). Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського. URL: <https://jagegip.kpi.ua/article/view/281597>

13. Ванін, В. В., Вірченко, Г. А., & Яблонський, П. М. (2019). Автоматизоване геометричне моделювання дискових робочих органів технічних об'єктів. *Інформаційні системи, механіка та керування*, 21, 5–13. URL: <https://doi.org/10.20535/2219-3804212019197602>

14. Ванін, В. В., Вірченко, Г. А., & Яблонський, П. М. (2022). Теоретичні основи структурно-параметричного геометричного моделювання виробів машинобудування. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського. 223 с. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/50383>

15. Ванін, В. В., Вірченко, Г. А., Яблонський, П. М., Лазарчук-Воробйова, Ю. В., & Воробйов, О. М. (2023). Модульно-геометричний підхід в автоматизованому проєктуванні виробів машинобудування. *Прикладна геометрія та інженерна графіка*, 105, 16–22. URL: <https://doi.org/10.32347/0131-579X.2023.105.16-22>

16. Ванін, В. В., Воробйов, О. М., Лазарчук-Воробйова, Ю. В., Голова, О. О., Луданов, Д. К., Залевський, С. В., & Яблонський, П. М. (2025). Гнучкий маніпулятор з дистанційним керуванням. Патент на винахід №129477. Дата публ. 07.05.2025, бюл. №19/2025. URL: <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1855235/>

17. Ванін, В. В., Яблонський, П. М., & Воробйов, О. М. (2022). До питання інтегрованого комплексного геометричного моделювання ґрунтообробних знарядь. *Збірник доповідей XI міжнародної науково-практичної конференції «Прикладна геометрія, інженерна графіка та об'єкти інтелектуальної власності»* (с. 4–7). Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського. URL: <https://jagegip.kpi.ua/issue/view/15550>

18. Вірченко, Г. А. (2011). Узагальнення структурно-параметричного підходу до геометричного моделювання об'єктів машинобудування: дис. ... докт. техн. наук: 05.01.01. Київ: НТУУ «КПІ». 357 с.

19. Вірченко, Г. А., Волоха, М. П., Яблонський, П. М., Воробйов, О. М., Голова, О. О., & Лазарчук-Воробйова, Ю. В. (2023). Комп'ютерне геометричне моделювання ґрунтообробних знарядь засобами структурно-параметричного формоутворення. *Збірник тез доповідей XVII міжнародної науково-практичної конференції «Обухівські читання»* (с. 39–42). Київ: НУБіП України URL: https://nubip.edu.ua/sites/default/files/u231/obuhovski_chitannya_2023.pdf

20. Вірченко, Г. А., Волоха, М. П., Яблонський, П. М., Воробйов, О. М., Голова, О. О., & Лазарчук-Воробйова, Ю. В. (2024). Геометричне моделювання поверхонь стрілчастих лап засобами структурно-параметричного формоутворення. *Збірник тез доповідей XVIII міжнародної науково-практичної конференції «Обухівські читання»* (с. 43–46). Київ: НУБіП України. URL: https://nubip.edu.ua/sites/default/files/u231/obuhovski_chitannya_2024_tezi_3_4.pdf

21. Вірченко, Г. А., Волоха, М. П., Яблонський, П. М., Воробйов, О. М., & Лазарчук-Воробйова, Ю. В. (2024). Комп'ютерне варіантне формоутворення стрілчастих лап. *Збірник доповідей XIII міжнародної науково-практичної конференції «Прикладна геометрія, інженерна графіка та об'єкти інтелектуальної власності»* (с. 4–7). Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського. URL: <https://jagegip.kpi.ua/article/view/309760>

22. Вірченко, Г. А., Волоха, М. П., Яблонський, П. М., Воробйов, О. М., & Лазарчук-Воробйова, Ю. В. (2025). Моделювання профілю борозни залежно від діаметра та кутів встановлення ґрунтообробного диска. *Збірник тез доповідей XIX міжнародної науково-практичної конференції «Обухівські читання»* (с. 19–23). Київ: НУБіП України. URL: https://nubip.edu.ua/sites/default/files/u231/1obuhovski_chitannya_2025_tezi.pdf

23. Вірченко, Г. А., Голова, О. О., Воробйов, О. М., Надкернична, Т. М., & Лазарчук-Воробйова, Ю. В. (2021). Структурно-параметрична модель поверхонь другого порядку. *Прикладна геометрія та інженерна графіка*, 100, 71–80. URL: <https://doi.org/10.32347/0131-579X.2021.100.71-80>

24. Вірченко, Г. А., Яблонський, П. М., Воробйов, О. М., & Лазарчук-Воробйова, Ю. В. (2025). Гнучкий маніпулятор з дистанційним керуванням як компонент роботизованої системи знарядь для механічного обробітку ґрунту. *Збірник доповідей XIV міжнародної науково-практичної конференції «Прикладна геометрія, інженерна графіка та об'єкти інтелектуальної власності»* (с. 33–36). Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського. URL: <https://jagegip.kpi.ua/issue/view/19136>

25. Вірченко, Г. А., Яблонський, П. М., Воробйов, О. М., & Лазарчук-Воробйова Ю. В. (2025). Гнучкий маніпулятор з дистанційним керуванням: сучасні підходи до роботи в екстремальному середовищі. *Тези доповідей 27 міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні проблеми геометричного моделювання»*. (с. 12). Запоріжжя: МДПУ. URL: <https://magazine.mdpu.org.ua/index.php/spm/issue/view/133/60>

26. Войновський, В., Любченко, С., & Муха, В. (2022). Новинки дискових борін від вітчизняних та іноземних виробників сільсько-господарської техніки. *Техніка і технології АПК*, 1–2, 10–13. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Titapk_2022_1-2_6

27. Войтюк, Д. Г., Дубровін, В. О., Іщенко, Т. Д. Сільськогосподарські та меліоративні машини. Київ: Вища освіта, 2004. 544 с.

28. Волик, Б. А., Теслюк, Г. В., Коновий, А. В., & Лепеть, Є. І. (2023). Аналітичний огляд методів моделювання засобів механізації обробітку ґрунту. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету*, 13(1). <https://oj.tsatu.edu.ua/index.php/visnik/article/view/353>

29. Волоха, М., Яблонський, П., Лазарчук, М., Лазарчук-Воробйова, Ю., Воробйов, О., & Грубич, М. (2023). Аналіз методів і особливостей цифровізації даних польових досліджень як бази для управління рослинництвом. *Техніко-технологічні аспекти розвитку та випробування нової техніки і технологій для сільського господарства України*, 33, 22–34. URL: [https://doi.org/10.31473/2305-5987-2023-2-33\(47\)-2](https://doi.org/10.31473/2305-5987-2023-2-33(47)-2)

30. Вольський, В. А. (2017). Дослідження умови та показників роботоздатності сферичних дискових робочих органів при взаємодії з ґрунтом. *Механізація та електрифікація сільського господарства*, 6, 50–57. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/mesg_2017_6_7

31. Воробйов, О. М. (2024). Комп'ютерне варіантне геометричне моделювання дводискових сошників засобами структурно-параметричного формоутворення. *Прикладна геометрія та інженерна графіка*, 107, 34–41. URL: <https://doi.org/10.32347/0131-579X.2024.107.34-41>

32. Воробйов, О. М., Вірченко, Г. А., Волоха, М. П., Яблонський, П. М., Лазарчук-Воробйова, Ю. В., Голова, О. О., Залевський, С. В., Лазарчук, М. В., & Воробйов, О. О. (2025). Гнучка стовба дводискового сошника з дистанційним керуванням. Патент на корисну модель № 161479. Дата публ. 10.12.2025. Бюл. № 50/2025. 6 с. URL: <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1889969/>

33. Воробйов, О. М., & Лазарчук-Воробйова, Ю. В. (2025). Застосування структурно-параметричного підходу до геометричного моделювання гнучкого маніпулятора як складової роботизованих систем *Прикладна геометрія та інженерна графіка*, 108, 64–71. URL: <https://doi.org/10.32347/0131-579x.2025.108.64-71>

34. Воробйов, О. М., & Яблонський, П. М. (2022). Аналіз сучасного стану геометричного моделювання ґрунтообробних знарядь. *Тези доповідей 24 міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні проблеми геометричного моделювання»* (с. 10). Запоріжжя: МДПУ. URL: <http://magazine.mdpu.org.ua/index.php/spm/issue/view/121/26>

35. Гапоненко, О. І. (2017). Обґрунтування параметрів пружних стояків дискових ґрунтообробних агрегатів: дис. ... канд. техн. наук: 05.05.11. Дослідницьке: УНДІ ПВТТСВ, 181 с.

36. Гевко, І., Станько, А., Пік, А., Лещук, Р., & Гурик, О. (2022). Обґрунтування техніко-економічної ефективності використання гвинтових робочих органів зі щіткоподібною еластичною робочою поверхнею. *Вісник Львівського національного університету природокористування. Серія «Агроінженерні дослідження»*, 26, 13–21. URL: <https://doi.org/10.31734/agroengineering2022.26.013>

37. Герасимчук, О. П. (2023). Теорія технічних систем. Луцьк: ЛНТУ, 112 с.

38. Голова, О. О., Залевський, С. В., Воробйов, О. М., & Лазарчук-Воробйова, Ю. В. (2021). Удосконалення геометричної форми незалежно керованого елемента маніпулятора. *Сучасні проблеми моделювання*, 21, 91–97. URL: <https://doi.org/10.33842/22195203/2021/21/91/97>

39. Гриценко, О. П., & Степаненко, С. П. (2023). Дослідження коефіцієнта корисної дії дискової борони від навантаження на сферичний диск. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету*, 23(1), 85–95. URL: <https://oj.tsatu.edu.ua/index.php/pratsi/article/view/622>

40. Гриценко, О. П., & Степаненко, С. П. (2023). Застосування теорії розмірностей і подібності для визначення параметрів і режимів роботи асиметричної дискової борони для обробітку ґрунту. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*, 4, 62–70. URL: <https://www.doi.org/10.37128/2520-6168-2023-4-7>

41. Грицишин, М. І. (2018). Наукові основи формування та оновлення техніко-технологічної бази аграрних підприємств. Київ: СПД Блохін О. А. 312 с.

42. Грицишин, М. І., & Перепелиця, Н. М. (2024). Обробіток ґрунту в умовах зміни клімату та його технічне забезпечення. *Механіка та автоматика агропромислового виробництва*, 4, 190–196. URL: <https://doi.org/10.37204/2786-7765-2024-1-22>

43. Гунько, І. В., & Бурлака, С. А. (2022). Оцінка енергетичних показників ґрунтообробного агрегату. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*, 2, 47–52. URL: <https://www.doi.org/10.37128/2520-6168-2022-2-5>

44. Гунько, І. В., & Грибик Р. І. (2022). Моделювання ґрунтообробного агрегату з розробкою рекомендації підбору робочих органів. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*, 4, 34–39. URL: <https://www.doi.org/10.37128/2520-6168-2022-4-4>

45. Гуцол, О. П. (2012). Обґрунтування параметрів і режимів руху ґрунтообробних машин з дисковими робочими органами: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.05.11. Мелітополь: ТДАТУ. 22 с.

46. Гуцол, О. П., & Ковбаса, В. П. (2016). Обґрунтування параметрів і режимів руху ґрунтообробних машин з дисковими робочими органами. Київ: НУБіП України. 145 с.

47. Дворник, А. (2022). Вплив розміщення робочих органів секції агрегату смугового обробку ґрунту на тяговий опір та витрату палива. *Техніко-технологічні аспекти розвитку та випробування нової техніки і технологій для сільського господарства України*, 31, 96–103. URL: [http://dx.doi.org/10.31473/2305-5987-2022-2-31\(45\)-8](http://dx.doi.org/10.31473/2305-5987-2022-2-31(45)-8)

48. Днесь, В., Кудриницький, Р., & Скібчик, В. (2020). Методичні засади визначення ефективності використання техніки під час обробітку ґрунту, внесення добрив і сівби ярих культур за енергетичним показником. *Вісник Львівського національного аграрного університету. Агроінженерні дослідження*, 24, 77–82. URL: <https://doi.org/10.31734/agroengineering2020.24.077>

49. Добрянський, С. С., & Малафеев, Ю. М. (2020). Технологічні основи машинобудування. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 379 с.

50. Дубовой, В. М., Кветний, Р. Н., Михальов, О. І., & Усов, А. В. (2017). Моделювання та оптимізація систем. Вінниця: ТД «Еднльвейс», 804 с.

51. Довгополий, А. С., Загірський, А. В. & Збруцький, О. В. (2024). Основи створення автономної системи керування рухом наземного роботизованого комплексу на малих дистанціях. *Механіка гіроскопічних систем*, 47, 5–16. URL: <https://doi.org/10.20535/0203-3771472024307756>

52. Думич, В., Батюк, Ю., & Падюка, Т. (2015). Ефективність застосування дискових борін та агрегатів у господарствах різного типу. *Техніко-технологічні аспекти розвитку та випробування нової техніки і технологій для сільського господарства України*, 19, 177–184. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Ttar_2015_19_22

53. Заєць, М. Л. (2023). Вплив параметрів дискових сошників на передавальну здатність прорізання пожнивних решток у системі нульового обробітку ґрунту. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин*, 53, 16–22. URL: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2023.53.16-22>

54. Залипка, В. Д. (2022). Особливості створення та застосування наземних роботизованих комплексів у провідних країнах світу та Україні. *Науковий вісник НЛТУ України*, 32(4), 60–65. URL: <https://doi.org/10.36930/40320410>

55. Зінько, Р. В., Круць, Т. І., & Поляков, А. П. (2022). Аналіз методів створення нових технічних систем. *Вісник машинобудування та транспорту*, 2, 30–41. URL: <https://doi.org/10.31649/2413-4503-2022-16-2-30-41>
56. Зінько, Р. В., Черевко, Ю. М., Поляков, А. П., & Бойко, О. Д. (2022). Конструкторське проектування технічних систем. *Вісник машинобудування та транспорту*, 1, 80–87. URL: <https://doi.org/10.31649/2413-4503-2022-15-1-80-87>
57. Зінько, Р. В., Шуляк, М. Л., Скварок, Ю. Ю., & Глобчак, М. В. (2021). Аналіз методик проектування сільськогосподарських машин. *Інженерія природокористування*, 1, 75–85. URL: <https://doi.org/10.5281/zenodo.6902711>
58. Зубко, В. М., Сіренко, В. Ф., & Кузіна, Т. В. (2016). Аналіз конструкцій сошників посівних машин. *Інженерія природокористування*. 1. 98–102. URL:: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Iprk_2016_1_18
59. Кветний, Р. Н., Богач, І. В., Бойко, О. Р., Софіна, О. Ю., & Шушура, О. М. (2012). Комп'ютерне моделювання систем та процесів. Методи обчислень. Вінниця: ВНТУ, 193 с.
60. Кириченко, І. Г., & Черніков, О. В. (2023). Можливості та обмеження комп'ютерного моделювання технологічних машин. *Вісник Харківського національного автомобільно-дорожнього університету*, 101(1), 53–59. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/vhad_2023_101%281%29_9
61. Кірчук, Р. В., & Дударев, І. М. (2014). Математичне моделювання машин. Луцьк: ЛНТУ, 134 с.
62. Кобець, А. С., Волик, Б. А., & Пугач, А. М. (2011). Ґрунтообробні машини: теорія, конструкція, розрахунок. Дніпропетровськ: Свидлер А. Л. 140 с.
63. Ковалевський, С. В., Ковалевська, О. С., & Сидюк, Д. М. (2023). Комплексне управління життєвим циклом виробів машинобудування. *Технічна інженерія*, 2, 67–73. URL: [https://doi.org/10.26642/ten-2023-2\(92\)-67-73](https://doi.org/10.26642/ten-2023-2(92)-67-73)
64. Коломієць, С. М., & Вершков, О. О. (2017). Екологізація механічного обробітку ґрунту. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету. Технічні науки*, 17(2), 70–77. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Ptdau_2017_17_2_12.

65. Корчак, М., Рудь, А., Грушецький, С., & Павельчук, Ю. (2023). Обґрунтування дискового робочого органа комбінованого способу обробітку ґрунту та процесу розрізання рослинних залишків кукурудзи. *Вісник Львівського національного університету природокористування. Агроінженерні дослідження*, 26, 30–36. URL: <https://doi.org/10.31734/agroengineering2022.26.030>

66. Кравець, В., Кравець, О., Лапковський, С., Фролов, В., Гладський, М., & Данилова, Л. (2023). Системно-структурний аспект вибору елементів робототехнічних систем. *Технічні науки та технології*, 4, 40–51. URL: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2023-4\(34\)-40-51](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2023-4(34)-40-51)

67. Кравець, В. О., Кравець, О. М., Фролов, В. К., Лапковський, С. В., Гладський, М. М., & Данилова, Л. М. (2024). Використання морфологічних методів при проектуванні захватних пристроїв. *Вісник Херсонського національного технічного університету*, 4, 70–75. URL: <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2024.4.8>

68. Кравець, В. О., Кравець, О. М., Лапковський, С. В., Фролов, В. К., Гладський, М. М., & Приходько, В. П. (2024). Аналіз розмірних зв'язків роботизованої складальної системи. *Вісник Херсонського національного технічного університету*, 1, 54–62. URL: <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2024.1.7>

69. Кривов, Г. О., Кривова, С. Г., Зворикін, К. О., & Зубаньов, О. Є. (2022). *Основи системної інженерії*. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 322 с.

70. Кропівний, В. М., Свірень, М. О., Кузик, О. В., Амосов, В. В., & Козловський, М. А. (2020). Технологічні особливості виготовлення дискових робочих органів ґрунтообробних та посівних машин. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин*, 50, 140–151. URL: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2020.50.140-151>

71. Кузнецов, Ю. М., & Придальний, Б. І. (2023). *Теорія технічних систем в аспектах досліджень та технічної творчості*. Луцьк: Вежа-Друк, 284 с.

72. Куценко, Л. М., & Шоман, О. В. (2023). *Геометричне моделювання об'єктів, явищ і процесів*. Харків: Технологічний центр груп, 248 с.

73. Лебедєв, А., Лебедєв, С., Коробко, А., & Шевченко, І. (2022). Формування тяговошвидкісних властивостей трактора загального призначення. *Техніко-технологічні аспекти розвитку та випробування нової техніки і технологій для сільського господарства України*, 31, 86–95. URL: [http://dx.doi.org/10.31473/2305-5987-2022-2-31\(45\)-7](http://dx.doi.org/10.31473/2305-5987-2022-2-31(45)-7)
74. Лебедєв, С., Коробко, А., Лебедєв, А., & Шуляк, М. (2023). Технологічна адаптація тракторів загального призначення до природних умов ґрунтообробки. *Техніко-технологічні аспекти розвитку та випробування нової техніки і технологій для сільського господарства України*, 33, 57–67. URL: [https://dx.doi.org/10.31473/2305-5987-2023-2-33\(47\)-5](https://dx.doi.org/10.31473/2305-5987-2023-2-33(47)-5)
75. Лісовий, І. О., Бойко, А. І., Свіренєв, М. О., & Пушка, О. С. (2015). Прямая сівба та обґрунтування параметрів сошника. *Вісник Українського відділення Міжнародної академії аграрної освіти*, 3, 177–190. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/vuvmaao_2015_3_29
76. Ловейкін, В. С., & Ромасевич, Ю. О. (2017). Теорія технічних систем. Київ: КОМПРИНТ, 291 с.
77. Ловейкін, В. С., Ромасевич, Ю. О., Кульпін, Р. А. (2018). Динаміка й оптимізація машин. Київ: Компрінт, 310 с.
78. Матвійчук, В. А., Веселовська, Н. Р., & Шаргородський, С. А. (2021). Математичне моделювання новітніх технологічних систем. Вінниця: ВНАУ, 193 с.
79. Мороз, С. М., Васильковський, О. М., & Лещенко, С. М. (2023). Використання САД-програм при проєктуванні сільськогосподарських машин. *Сільськогосподарські машини*, 49, 15–21. URL: <https://doi.org/10.36910/acm.vi49.1010>
80. Обертюх, Р. Р., & Слабкий, А. В. (2025). Математичне моделювання механічних систем. Вінниця: ВНТУ, 119 с.
81. Орловський, Б. В. (2018). Мехатроніка в галузевому машинобудуванні. Київ: КНУТД, 416 с.
82. Павленко, П. М., Філоненко, С. Ф., Чередніков, О. М., & Трейтяк, В. В. (2017). Основи математичного моделювання систем і процесів. Київ: НАУ, 392 с.

83. Пічкур, В. В., Капустян, О. В., & Собчук, В. В. (2020). Теорія динамічних систем. Луцьк: Вежа-Друк, 348 с.
84. Поліщук, М. М., & Ткач; М. М. (2021). Робототехнічні системи: проєктування і моделювання. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 112 с.
85. Придворов, С. С., & Близниченко, Г. С. (2023). Підвищення якості систем керування енергетичним обладнанням шляхом удосконалення математичного моделювання. *Машинобудування*, 32, 37–45. URL: <https://doi.org/10.32820/2079-1747-2023-32-37-45>
86. Пташний, О. Д., & Першина, Ю. І. (2023). Моделювання управління технологічним процесом. *Машинобудування*, 31, 4–11. URL: <https://www.doi.org/10.32820/2079-1747-2023-31-4-11>
87. Пустовіт, С. В., Котков, В. І., & Шмалюк, М. І. (2016). Визначення зон деформації ґрунту при роботі дискових знарядь. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин*, 46, 100–104. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Zmntz_2016_46_16
88. Риндяєв, В. І. (2021). Аналіз діючих навантажень в машинах для обробки ґрунту. *Інженерія природокористування*, 1, 86–89. URL: <https://doi.org/10.5281/zenodo.6902834>
89. Роговський, І. Л. (2020). Розробка комплексних техніко-технологічних заходів підвищення працездатності сільськогосподарських машин: дис. ... докт. техн. наук: 05.05.11. Київ: НУБіП України, 584 с.
90. Руденко, М. В. (2019). Вплив цифрових технологій на аграрне виробництво: методичний аспект *Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського. Серія: економіка і управління*, 30 (6), 30–37. URL: <https://doi.org/10.32838/2523-4803/69-6-28>
91. Рудь, А. В., Грушецький, С. М., Корчак, М. М., & Замойський, С. М. (2024). Роль сучасних технологій у забезпеченні сталого розвитку сільського господарства шляхом оптимізації процесів посіву. *Вісник Сумського національного аграрного університету. Серія: Механізація та автоматизація виробничих процесів*, 1, 69–74. URL: <https://doi.org/10.32782/msnau.2024.1.9>

92. Саєнко, С. Ю., & Нечипоренко, І. В. (2017). Основи САПР. Харків: ХДУХТ, 119 с.
93. Севостьянов, І. В. (2014). Теорія технічних систем. Вінниця: ВНТУ, 181 с.
94. Семенюта, А. М. (2013). Обґрунтування конструктивної схеми, параметрів та режимів роботи дискового плуга: дис. ... канд. техн. наук: 05.05.11. Мелітополь: ТДАТУ, 192 с.
95. Середа, Л. П., & Місюля, А. М. (2014). Дослідження впливу модернізованого способу підгортання картоплі на її урожайність. *Збірник наукових праць Вінницького національного аграрного університету. Серія: Технічні науки*, 2, 112–117. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/znpvnutn_2014_2_19
96. Сєдих, К. В. (2021). Обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів дискатора з пружними стійками: дис. ... канд. техн. наук: 05.05.11. Харків: ХНТУСГ. 248 с.
97. Скрипник, В. І. (2019). Розробка, виробництво, конструктивні особливості нової сільськогосподарської техніки. Київ: Літера ЛТД. 256 с.
98. Сокол, С. П., & Волик, Б. А. (2019). Формування конструктивних параметрів ґрунтообробних машин методами фізичного моделювання. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства*, 198, 40–46. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vkhdtusg_2019_198_8
99. Струтинський, В. Б., Гуржій, А. М. (2023). Наземні роботизовані комплекси. Житомир: ПП Рута, 497 с.
100. Струтинський, С. В., & Семенчук, Р. В. (2023). Дослідження лінійних та кутових коливань рухомої платформи наземного роботизованого комплексу. *Mechanics and Advanced Technologies*, 7(1), 129–137. URL: <https://doi.org/10.20535/2521-1943.2023.7.1.266626>
101. Сусліков, Л. М., & Студеняк, І. П. (2019). Управління науковими проектами. Ужгород: УжНУ, 432 с.
102. Тарасов, О. Ф., Алтухов, О. В., Сагайда, П. І., Васильєва, Л. В., & Аносов, В. Л. (2017). Автоматизоване проектування і виготовлення виробів із застосуванням CAD/CAM/CAE-систем. Краматорськ: ЦТРІ «Друкарський дім», 239 с.

103. Терещук, М. О., & Якусевич, А. Г. (2022). Полігональний спосіб територіальної архітектурно-планувальної кластеризації. *Просторовий розвиток*, 1, 68–77. URL: <https://doi.org/10.32347/2786-7269.2022.1.68-79>

104. Теслюк, Г. В., Волик, Б. А., & Брижаний, І. Ю. (2015). Вплив конструктивних і кінематичних параметрів дискового плуга на величину тягового опору і якість розпушення ґрунту. *Вісник Українського відділення Міжнародної академії аграрної освіти*, 3, 116–123. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/vuvmaao_2015_3_20

105. Теслюк, Г. В., Волик, Б. А., Сокол, С. П., Кобець, О. М., & Семенюта, А. М. (2016). Ґрунтообробні агрегати на основі дискових робочих органів. Дніпропетровськ: ДДАЕУ. 144 с.

106. Усов, А. В., Савельєва, О. С., Становська, І. І., & Перпері, А. О. (2020). Математичні методи моделювання. Одеса: ВМВ, 500 с.

107. Худавердієва, В. (2022). Пріоритети інноваційного розвитку галузі сільського господарства. *International Science Journal of Engineering & Agriculture*, 1(3), 52–86. URL: <https://doi.org/10.46299/j.isjea.20220103.6>

108. Цибко, Г. Ю., & Горошко, Ю. В. (2025). Основи системного аналізу. Чернігів: НУЧК, 117 с.

109. Чайка, Т. О. (2018). Роль мінімального обробітку ґрунту в органічному землеробстві. *Інженерія природокористування*, 2, 37–44. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Iprk_2018_2_8

110. Чайка, Т. О., Яснолоб, І. О., & Лотиш, І. І. (2019). Оцінка ресурсо- й енергозбереження в сучасних системах землеробства. *Землеробство*, 1, 47–55. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Zemlerobstvo_2019_1_10

111. Черніков, О. В. (2022). Розширення можливостей комп'ютерного моделювання за рахунок використання API (на прикладі пакету Autodesk Inventor). *Вісник Харківського національного автомобільно-дорожнього університету*, 99, 111–117. URL: <https://doi.org/10.30977/BUL.2219-5548.2022.99.0.111>

112. Черніков, О. В., Назарько, О. О., & Усенко, І. С. (2023). Розробка та впровадження бібліотеки додатків до пакету Autodesk Inventor.

Прикладна геометрія та інженерна графіка, 104, 190–200. URL: <https://doi.org/10.32347/0131-579X.2023.104.190-200>

113. Чорний, О. П., Титюк, В. К., Істоміна, Н. М., & Власенко, В. А. (2016). Математичні методи моделювання. Кременчук: ПП Щербатих О. В., 234 с.

114. Чуйко, Г. П., Дворник, О. В., & Яремчук, О. М. (2015). Математичне моделювання систем і процесів: Миколаїв: ЧДУ імені Петра Могили, 244 с.

115. Шашенко, О. М., Шаповал, В. Г., Гапєєв, С. М., Скобенко, О. В., & Хозяйкіна, Н. В. (2024). Механіка ґрунтів. Дніпро: НТУ «ДП», 339 с.

116. Шустік, Л., Гайдай, Т., Степченко, С., Сидоренко, С., Ленъ, О., & Ключай, О. (2022). Оцінювання якості роботи диско-чизеля ДЧ-4,5. *Техніко-технологічні аспекти розвитку та випробування нової техніки і технологій для сільського господарства України*, 31, 57–65. URL: [http://dx.doi.org/10.31473/2305-5987-2022-2-31\(45\)-4](http://dx.doi.org/10.31473/2305-5987-2022-2-31(45)-4)

117. Щербань, В. Ю., Колиско, О. З., Щербань, Ю. Ю., Мельник, Г. В., Колиско, М. І., & Кириченко, А. М. (2023). Математичне моделювання систем і технологічних процесів. Київ: Фастбінд Україна, 938 с.

118. Яблонський, П. М. (2024). Інтегроване комплексне геометричне моделювання ґрунтообробних знарядь: дис. ... докт. техн. наук: 05.01.01. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 424 с. URL: <https://www.knuba.edu.ua/specjalizovana-vchena-rada-d-26-056-06/>

119. Яблонський, П. М., Вірченко, Г. А., Волоха, М. П., Воробйов, О. М., & Лазарчук-Воробйова, Ю. В. (2022). До питання аналізу геометричних моделей сучасних ґрунтообробних знарядь. *Сучасні проблеми моделювання*, 24, 182–189. URL: <https://doi.org/10.33842/2313125X-2022-24-182-189>

120. Яблонський, П. М., Вірченко, Г. А., Роговський, І. Л., Волоха, М. П., & Воробйов, О. М. (2024). Варіантні комп'ютерні геометричні моделі відвалів полицевого плуга. *Матеріали XIV міжнародної науково-практичної конференції «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем»* (Т. 1, с. 76–78). Чернігів: НУ «Чернігівська політехніка». URL: https://drive.google.com/file/d/1s2IU7CHhsXHLKxCXEVMEM_AxquSi6b0q/view

121. Яковенко, І. Е., Пермяков, О. А., & Фесенко, А. В. (2022). Технологічні основи машинобудування. Харків: НТУ «ХПІ», 421 с.
122. Abbasi, R., Martinez, P., & Ahmad, R. (2022). The digitization of agricultural industry – a systematic literature review on agriculture 4.0. *Smart Agricultural Technology*, 2, 100042. URL: <https://doi.org/10.1016/j.atech.2022.100042>
123. Ahmad, F., Qiu1, B., Ding, O., Ding, W., Khan, Z., Shoaib, M., Chandio, F., Rehim, A., & Khaliq, A. (2020). Discrete element method simulation of disc type furrow openers in paddy soil. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 13(4), 103–110. URL: <https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20201304.4800>
124. Ahmad, F., Weimin, D., Qishuo, D., Hussain, M., & Jabran, K. (2015). Forces and straw cutting performance of double disc furrow opener in no-till paddy soil. *PLoS ONE*, 10(3), e0119648. URL: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0119648>
125. Aikins, K., Barr, J., Ucgul, M., Jensen, T., Antille, D., & Desbiolles, J. (2020). No tillage furrow opener performance: A review of tool geometry, settings and interactions with soil and crop residue. *Soil Research*, 58(7), 603–621. URL: <https://doi.org/10.1071/SR19153>
126. Alseekh, S., Klemmer, A., Yan, J., Guo, T., & Fernie, A. (2025). Embracing plant plasticity or robustness as a means of ensuring food security. *Nature Communications*, 16(1), 461. URL: <https://doi.org/10.1038/s41467-025-55872-4>
127. Alwan, A. A. (2019). A field study of soil pulverization energy by using different moldboards types under various operating condition. *Basrah Journal of Agricultural Sciences*, 32(2), 373–388. URL: <https://doi.org/10.37077/25200860.2019.284>
128. Autodesk AutoCAD 2024. Help. (2024). URL: <https://help.autodesk.com/view/ACD/2024/ENU/>
129. Autodesk Inventor Professional 2025. Help. (2025). URL: <https://help.autodesk.com/view/INVNTOR/2025/ENU/>

130. Bulgakov, V., Pascuzzi, S., Ivanovs, S., & Volskyi, V. (2019). Experimental investigations in draft resistance of spherical working tool of disk harrow. *18th International Scientific Conference Engineering for Rural Development* (Vol. 18, p. 144–152). Jelgava: LULST. URL: <https://www.doi.org/10.22616/ERDev2019.18.N171>
131. Chandio, F., Li, Y., Xu, L., Ma, Z., Ahmad, F., Cuong, D., & Lakhari, I. (2020). Predicting 3D forces of disc tool and soil disturbance area using fuzzy logic model under sensor based soil-bin. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 13(4), 77–84. URL: <https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20201304.5115>
132. Chen, W., Ren, J., Huang, W., Chen, L., Weng, W., Chen, C., & Zheng, S. (2024). Design and parameter optimization of a dual-disc trenching device for ecological tea plantations. *Agriculture*, 14(5), 704. URL: <https://doi.org/10.3390/agriculture14050704>
133. Damanauskas, V., & Janulevičius, A. (2022). Effect of tillage implement (spring tine cultivator, disc harrow), soil texture, forward speed, and tillage depth on fuel consumption and tillage quality. *Journal of Agricultural Engineering*, 53(3), 1371. URL: <https://doi.org/10.4081/jae.2022.1371>
134. Derevjanko, D., Holovach, I., Bulgakov, V., Ihnatiev, Y., & Nozdrovicky, L. (2020). Mathematical model of uniform cereal crops seeding using a double-disk coulters. *Acta Technologica Agriculturae*, 23(4), 195–200. URL: <https://doi.org/10.2478/ata-2020-0031>
135. Ebadi, E., Balcilar, M., & Are, W. (2025). Assessing the Role of the Oil Market in Rising Food Prices: Strategic Implications for Food Security in Gulf Cooperation Council Countries. *International Journal of Energy Economics and Policy*, 15(1), 490–506. URL: <https://doi.org/10.32479/ijeep.17866>
136. Eltaief, A., Amor, S., Louhichi, B., Alrasheedi, N., & Seibi, A. (2024). Automated assessment tool for 3D computer-aided design models. *Applied Sciences*, 14(11), 4578. URL: <https://doi.org/10.3390/app14114578>
137. Garcia, D. R. (2018). Geometric manipulation of NURBS surfaces for computational meshes: doctoral thesis. Madrid: Polytechnic University, 165 p.

138. Hamid, A. A., & Alsabbagh, A. R. (2023). Effect of moldboard types, two depths of tillage and two speeds of tractor in some physical properties and pulverization of soil. *Kufa Journal For Agricultural Sciences*, 15(1), 105–116, URL: <https://doi.org/10.36077/kjas/2023/v15i1.10334>
139. Karayel, D., Jotautiene, E., & Šarauskis, E. (2024). The effect of furrow opener and disc coulter configurations on seeding performance under different residue cover densities. *AgriEngineering*, 6(2), 1277–1288. URL: <https://doi.org/10.3390/agriengineering6020073>
140. Keska, P. (2021). SolidWorks 2021: Part Modeling, Assemblies, and Drawings. Warszawa: CADvantage, 1585 p.
141. Khan, T., & Rezwana, S. (2021). A review of CAD to CAE integration with a hierarchical data format (HDF)-based solution. *Journal of King Saud University – Engineering Sciences*, 33, 248–258. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2020.04.009>
142. Khosravani, A., Desbiolles, J., Fielke, J., Ucgul, M., & Saunders, C. (2023). Prediction of single disc seeding system forces, using a semi-analytical and discrete element method (DEM). *Agriculture*, 13(1), 206. URL: <https://doi.org/10.3390/agriculture13010206>
143. Kozma, D., Varga, P., & Larrinaga, F. (2021). System of systems lifecycle management – a new concept based on process engineering methodologies. *Applied Sciences*, 11(8), 3386. URL: <https://doi.org/10.3390/app11083386>
144. Kresan, T., Kadhim, A., Pylypaka, S., Volina, T., & Voloshko, T. (2024). Construction of the working surfaces of the tillage screw body from the compartments of the developable helicoid. *Machinery and Energetics*, 15(3), 9–21. URL: <https://doi.org/10.15407/pp2024.01.038>
145. Kumar, N., Sawant, C., Sharma, R., Chhokar, R., Tiwari, P., Singh, D., Roul, A., Tripathi, S., Gill, S., & Singh, G. (2021). Combined effect of disc coulters and operational speeds on soil disturbance and crop residue cutting under no-tillage system in soil bin. *Journal of Scientific & Industrial Research*, 80(9), 739–749. URL: <https://doi.org/10.56042/jsir.v80i09.40333>

146. Malasli, M., & Çelik, A. (2023). Effects of the disc and tilt angle of a single disc-type furrow opener of a no-till seeder on residue distribution and the furrow profile. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 7(6), 12. URL: <https://doi.org/10.55730/1300-011X.3146>

147. Mankhi, A., & Jebur, H. (2022). A study some technical indicators under impact tillage depth and disk harrow angle of the compound machine. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1060, 012137. URL: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1060/1/012137>

148. Maple Programming Guide. (2024). URL: https://www.maplesoft.com/documentation_center/Maple2024/ProgrammingGuide.pdf

149. Maple User Manual. (2024). URL: https://www.maplesoft.com/documentation_center/Maple2024/UserManual.pdf

150. Nikolayenko, S., Virchenko, G., Volokha, M., **Vorobiov, O.**, & Lazarchuk-Vorobiova, Y. (2025). Improving energy efficiency of double-disc coulters using boundary estimation method of seed furrow profile influence. *Machinery & Energetics*, 16(3), 20–32. URL: <https://doi.org/10.31548/machinery/3.2025.20>

151. Nesvidomin, A., Pylypaka, S., Ruzhilo, Z., Volina, T., Liannoi, Y., Botvinovska, S., Zakharova, I., Savchenko, L., Savchenko, O., & Rybenko, I. (2024). Substantiating the rational shape of a drum-type working tool for surface soil treatment. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3(1), 25–32. URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.303792>

152. Parihar, D., Dogra, B., & Narang, M. (2023). Performance evaluation of different furrow openers for sustainable tillage: a review. *Indian Journal of Ecology*, 50(4): 1133–1142. URL: <https://doi.org/10.55362/IJE/2023/4025>

153. Pylypaka, S., Hropost, V., Volina, T., Kalenyk, M., Ruzhilo, Z., Dieniezhnikov, S., Tarelnyk, N., Tatsenko, O., Semirnenko, S., & Motsak, S. (2024). Constructing a model of the axis form in a S-shaped riser of a cultivator paw. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5(1), 65–71. URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.311404>

154. Ramnath, S., Witek, K., Shah, J., & Detwiler, D. (2025). An approach for integrating analytical and experiential knowledge for structural design. *Computer-Aided Design & Applications*, 22(1), 42–67. URL: <https://www.doi.org/10.14733/cadaps.2025.42-67>
155. Ranta, O., Ghețe, A., Stănilă, S., Muntean, M., Marian, O., & Molnar-Irimie, A. (2021). Influence of design of the disk furrow opener of no-till sowing machines on the seedbed quality. *Romanian Agricultural Research*, 38, 239–249. URL: <https://doi.org/10.59665/rar3826>
156. Robinson, G. M. (2024). Global sustainable agriculture and land management systems. *Geography and Sustainability*, 5(4), 637–646. URL: <https://doi.org/10.1016/j.geosus.2024.09.001>
157. Rogovskii, I., Titova, L., Trokhaniak, V., Haponenko, O., Ohienko, M., & Kulik, V. (2020). Engineering management of tillage equipment with concave disk spring shanks. *Agricultural Engineering*, 60(1), 45–52. URL: <https://doi.org/10.35633/INMATEH-60-05>
158. Rosu, B., Voicu, G., Constantin, G., Tudor, P., & Stefan, E. (2024). Aspects regarding the physical parameters and wear in the work process of the disc openers for seeding machines. *Agriculture*, 14(7), 1066. URL: <https://doi.org/10.3390/agriculture14071066>
159. Sadek, M., Chen, Y., & Zeng, Z. (2021). Draft force prediction for a high-speed disc implement using discrete element modelling. *Biosystems Engineering*, 202, 133–141. URL: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2020.12.009>
160. SolidWorks Help. (2024). URL: https://help.solidworks.com/2024/English/SolidWorks/sldworks/r_help_fundamentals.htm
161. Srivastava, A. K., Goering, C. E., Rohrbach, R. P., & Buckmaster, D. R. (2016). Engineering principles of agricultural machines. American Society of Agricultural and Biological Engineers. 553 p.
162. Stender, S., Tsvihun, I., Balla, I., Borkovska, V., & Haibura, Yu. (2024). Innovative approaches to improving the agricultural sector in the era of digitalization of the economy. *Scientific Horizons*, 27(3), 154–163. URL: <https://doi.org/10.48077/scihor3.2024.154>

163. Strutynskyi, S. V., & Semenchuk, R. V. (2021). Determination of the influence of soil irregularities on dynamic processes in caterpillar engines of a terrestrial robotic complex. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, International Scientific Conference Energy Efficiency in Transport*, 012050. URL: <https://www.doi.org/10.1088/1757-899X/1021/1/012050>

164. Strutinsky, V. B., Gurzhii, A. M., & Yurchyshyn, O. Y. (2021). Mathematical modeling of dynamic loads on the ground robotic complex of special purpose. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, International Scientific Conference Energy Efficiency in Transport*, 012049. URL: <https://www.doi.org/10.1088/1757-899X/1021/1/012049>

165. Sugirbay, A., Zhao, K., Liu, G., Hu, G., Chen, J., Mustafin, Z., Iskakov, R., Kakabayev, N., Muratkhan, M., Khan, V., Chen, Y., & Zhang, S. (2023). Double disc colter for a zero-till seeder simultaneously applying granular fertilizers and wheat seeds. *Agriculture*, 13(5), 1102. URL: <https://doi.org/10.3390/agriculture13051102>

166. Sun, J, Wang, Y., Zhang, S., Ma, Y., Tong, J., & Zhang, Z. (2020). The mechanism of resistance-reducing/anti-adhesion and its application on biomimetic disc furrow opener. *Mathematical Biosciences and Engineering*, 17(5), 4657–4677. URL: <https://doi.org/10.3934/mbe.2020256>

167. Tesliuk, H., Volik, B., Sokol, S., & Ponomarenko, N. (2019). Design of working bodies for tillage tools using the methods of bionics. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3(1), 49–54. URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.169156>

168. Tukhtakuziev, A., Rasuljonov, A., Azizov, S., & Temirkulova, N. (2024). Substantiation of the parameters of the double flat disc seeder for directly sowing repeated crops in the soil after wheat crop harvesting in Uzbekistan. *IV International Conference on Agricultural Engineering and Green Infrastructure for Sustainable Development*, .105, 01015. URL: <https://doi.org/10.1051/bioconf/202410501015>

169. Usenko, V., Chernikov, O., Usenko, I., & Usenko, D. (2025). Optimization of technical system reliability taking into account resource minimization. *Municipal*

Economy of Cities. Series: Engineering science and architecture, 1, 203–208. URL: <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2025-1-189-203-208>

170. Villa, D., Furas, F., Pralits, J. O., Vernengo, G., & Gaggero, S. (2021). An effective mesh deformation approach for hull shape design by optimization. *Journal of Marine Science and Engineering*, 9(10), 1107, URL: <https://doi.org/10.3390/jmse9101107>

171. Vorobiov, O. (2024). Computer modelling of basic design and operational geometrical parameters of double disc coulters. *Вісник Сумського національного аграрного університету. Серія: механізація та автоматизація виробничих процесів*, 4(58), 12–20. URL: <https://doi.org/10.32782/msnau.2024.4.2>

172. Wang, W., Diao, P., Jia, H., & Chen, Y. (2020). Design and experiment evaluation of furrow compaction device with opener for maize. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 13(2), 123–131. URL: <https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20201302.4941>

173. Xu, G., Xie, Y., Peng, S., Liang, L., & Ding, Q. (2023). Performance evaluation of vertical discs and disc coulters for conservation tillage in an intensive rice–wheat rotation system. *Agronomy*, 13, 1336. URL: <https://doi.org/10.3390/agronomy13051336>

174. Xuchu, W., Qingshun, B., Siyu, G., Liang, Z., & Kai, C. (2023). A toolpath planning method for optical freeform surface ultra-precision turning based on NURBS surface curvature. *Machines*, 11(11), 1017, URL: <https://doi.org/10.3390/machines11111017>

175. Yablonskyi, P., Rogovskii, I., Sobczuk, H., Virchenko, G., Volokha, M., & Vorobiov, O. (2024). Computational approach to geometric modelling of plow bodies. *Journal of Engineering Sciences*, 11(1), E9–E18. URL: [https://www.doi.org/10.21272/jes.2024.11\(1\).e2](https://www.doi.org/10.21272/jes.2024.11(1).e2)

176. Ye, R., Ma, X., Zhao, J., Liao, J., Liu, X., Xi, L., & Su, G. (2023). Optimization and design of disc-type furrow opener of no-till seeder for green manure crops in south Xinjiang orchards. *Agriculture*, 13(8), 1474. URL: <https://doi.org/10.3390/agriculture13081474>

177. Zbrutskyi, O. V., Osokin, V., & Min, Z. (2021). Mathematical model of the automatic control system in the problem of guaranteed accuracy. *Mechanics of gyroscopic systems*, 42, 34–43. URL: <https://doi.org/10.20535/0203-3771422021268462>

178. Zeng, Z., Thoms, D., Chen, Y., & Ma, X. (2021). Comparison of soil and corn residue cutting performance of different discs used for vertical tillage. *Scientific Reports*, 11, 2537. URL: <https://doi.org/10.1038/s41598-021-82270-9>

179. Zhou, H., Feng, B., Liu, Z., Chang, H., & Cheng, X. (2022). NURBS-based parametric design for ship hull form. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(5), 686, URL: <https://doi.org/10.3390/jmse10050686>

180. Zubko, V., Sokolik, S., Khvorost, T., Melnyk, V. (2021). Factors affecting quality of tillage with disc harrow. *International Scientific Conference Engineering for Rural Development*, 1193–1199. <https://doi.org/10.22616/ERDev.2021.20.TF262>

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А

ПРИКЛАДИ РЕАЛІЗАЦІЇ ЗАПРОПОНОВАНОГО ПІДХОДУ

Цей додаток дисертації містить ілюстрації практичного використання викладеного підходу щодо геометричного моделювання дискових знарядь для механічного обробітку ґрунту. Розглянуто, зокрема, варіантну побудову теоретичних поверхонь дисків та відповідних комп'ютерних твердотільних моделей. Наведено інформацію стосовно формоутворення проаналізованих сошників і підгортачів, відомості про отримані автором патенти з опрацьованої тематики.

А.1. Комп'ютерне варіантне моделювання дисків

Цей підрозділ присвячено параметричній побудові теоретичних поверхонь дисків для механічного обробітку ґрунту та належних концептуальних твердотільних моделей на стадії ескізного проектування. Зазначені дані розміщено у двох наступних пунктах.

А.1.1. Робочі поверхні

Математичний апарат запропонованої узагальненої моделі формоутворення робочих поверхонь дисків, яка охоплює різноманітні плоскі, конічні, сферичні, еліпсоїдні, параболоїдні, гіперболоїдні та тороподібні поверхні, подано в підрозділі 2.2 дисертації. Розроблену на підставі цього комп'ютерну програму для середовища математичного моделювання Maple представлено нижче.

restart:

with(plots):

#

*sf:=1: # 1 – диск із твірною дугою кола (сферична та торова поверхні),
0 тощо – інші диски*

усі розміри в мм

```

Dm:= 400: d:= 40: # діаметр диска та внутрішнього отвору
if sf =1 and d ≠ 0 then Dm:= Dm-d: end if: # у даному випадку виконаними
далі операціями реалізується визначений вище діаметр
#
# Побудовані варіанти поверхонь:
# 1. Плоский диск: sf:=0: Dm:=400: d:=0: x0:=d/2: y0:=0: z0:=0:
x1:=0: y1:=0: z1:=0: x2:=Dm/2: y2:=0: z2:=0: w1:=0: Рис. 2.10 а.
# 2. Плоский диск: sf:=0: Dm:=400: d:=40: x0:=d/2: y0:=0: z0:=0:
x1:=0: y1:=0: z1:=0: x2:=Dm/2: y2:=0: z2:=0: w1:=0: Рис. 2.10 б.
# 3. Конічний диск: sf:=0: Dm:=300: d:=0: x0:=d/2: y0:=0: z0:=0:
x1:=0: y1:=0: z1:=0: x2:=Dm/2: y2:=0: z2:=10: w1:=0: Рис. 2.11 а, z2=h.
# 4. Конічний диск: sf:=0: Dm:=400: d:=40: x0:=d/2: y0:=0: z0:=0:
x1:=0: y1:=0: z1:=0: x2:=Dm/2: y2:=0: z2:=50: w1:=0: Рис. 2.11 б, z2=h.
# 5. Сферичний диск: sf:=1: Dm:=450: d:=0: R:=600: Рис. 2.12 а.
# 6. Торовий диск: sf:=1: Dm:=400: d:=40: R:=300: Рис. 2.12 б.
if sf=1 then R:=300: h:=evalf(R-sqrt(R^2-Dm^2/4): tet:=2*arcsin(
sqrt(Dm^2/4+h^2)/(2*R)): w1:=cos((tet/2): x0:=d/2: y0:=0: z0:=0: x1:=
R*tan(tet/2)+d/2: y1:= 0: z1:= 0: x2:= Dm/2+d/2: y2:=0: z2:=h: end if: # R –
радіус твірної дуги кола
if sf ≠ 1 then x0:= d/2: y0:= 0: z0:= 0: x1:= 0: y1:= 0: z1:=0: x2:= Dm/2:
y2:=0: z2:=0: w1:= 0: end if:
w:= proc (u) (1-u)^2+2*w1*(1-u)*u+u^2 end proc:
pL:=plot3d([((1-u)^2*x0+2*w1*(1-u)*u*x1+u^2*x2)*cos(v)/w(u), ((1-u)^2*x0+
2*w1*(1-u)*u*x1+u^2*x2)*sin(v)/w(u), ((1-u)^2*z0+2*w1*(1-u)*u*z1+u^2*z2)/w(u)],
u=0..1, v=0..2*Pi, color="DodgerBlue", transparency=.75):
kvw:=10: display({pL}, axes = normal, view = [floor(-(Dm+d)/(2*kvw))*kvw
..ceil((Dm+d)/(2*kvw))*kvw floor(-(Dm+d)/(2*kvw))*kvw..ceil((Dm+d)/(2*kvw))*kvw,
0..ceil(Dm/4/kvw)*kvw], transparency = .75, orientation = [-50, 54, 0], labelfont =
[Times, roman, 14], axesfont = [Times, Roman, 14], scaling = constrained)

```

Проектні інформаційні параметри коду відповідають зображенням рис. 2.10 ... 2.12. Для отримання результатів необхідно перенести наведені в належних коментарях величини до потрібного оператора та виконати програму.

Наступний пункт доповнює подані у другому розділі дисертації приклади комп'ютерних твердотільних моделей дисків для забезпечення більш широкого уявлення про опрацьовані технічні об'єкти.

А.1.2. Концептуальні твердотільні моделі

На двох рисунках нижче показано деякі моделі проектних варіантів дисків. Для кращого сприйняття відповідні об'єкти представлені ортогональною та аксонометричною проєкціями.

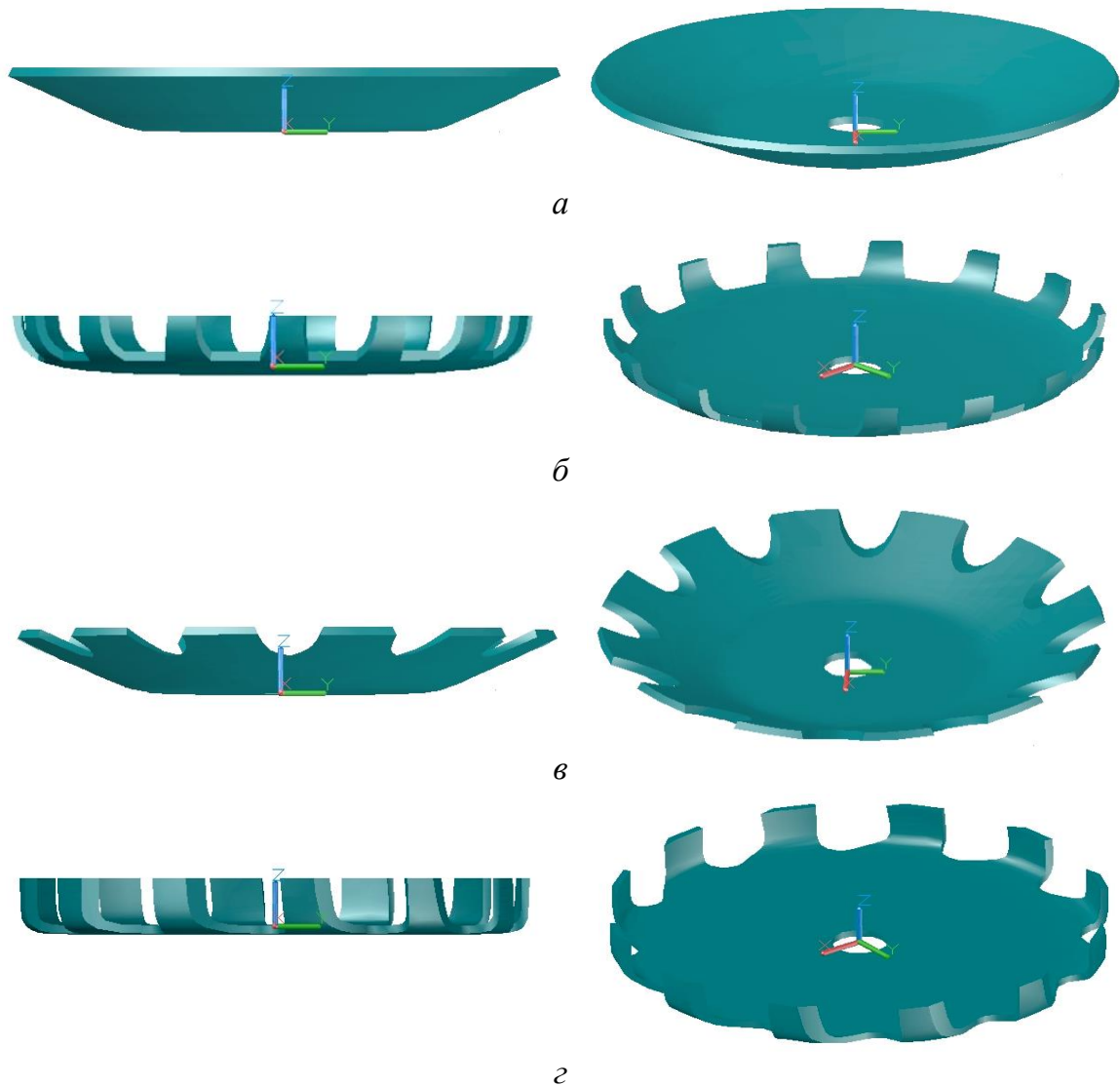


Рис. А.1. Тарілкоподібні диски:

a – без вирізів; *б, в, г* – з трапецеїдальними, дугами кіл та асиметричними вирізами

Рис. А.1 *а* ілюструє тарілкоподібні диски без вирізів, а решта зображень рис. А.1 – з указаними вирізами. На рис. А.2 подано чотири диски з опуклими вгору робочими поверхнями та різними вирізами.

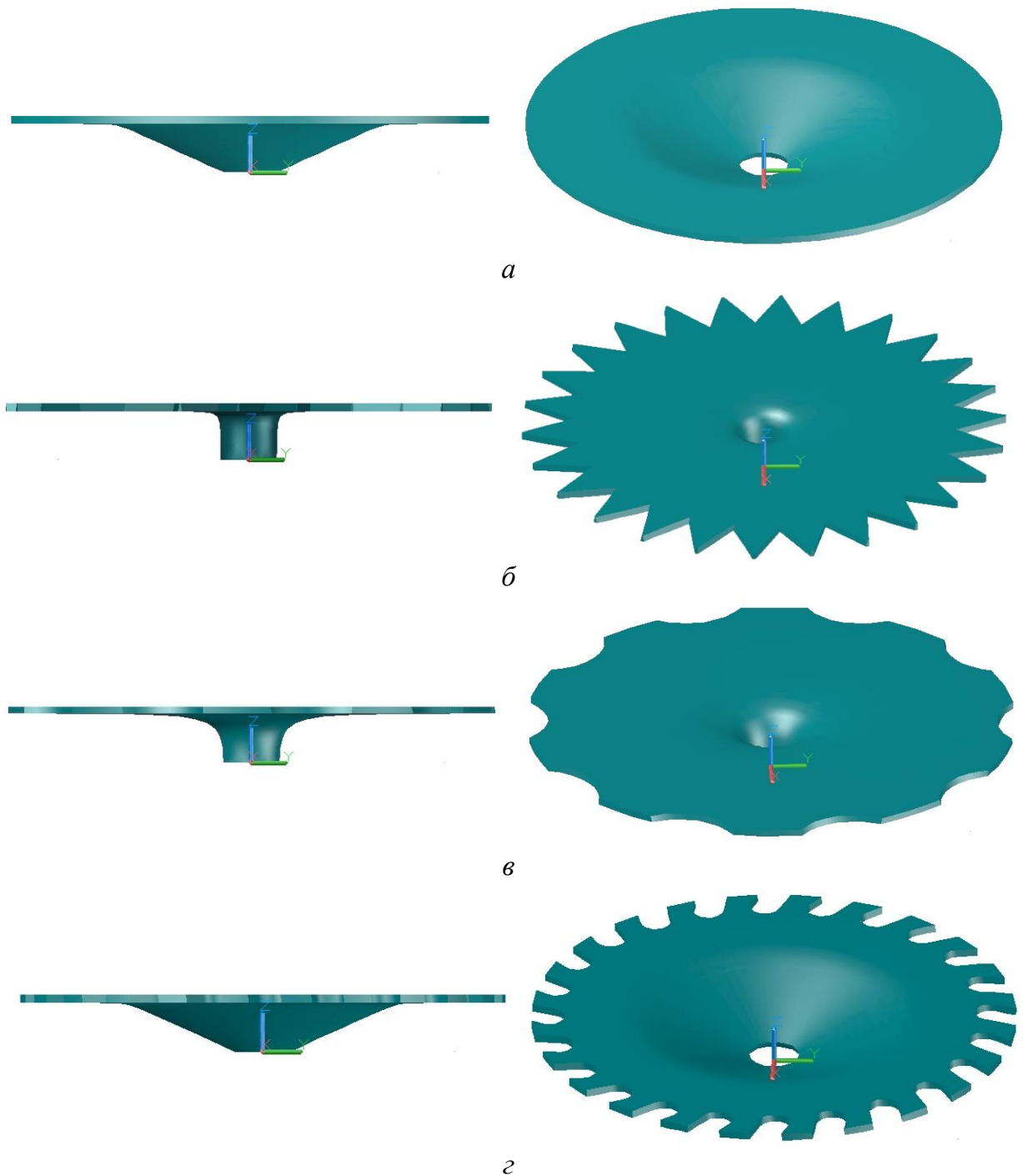


Рис. А.2. Диски з опуклими вгору робочими поверхнями:

а – без вирізів; *б, в, з* – з трикутними, дугами кіл та асиметричними вирізами

Очевидно, що реальне розмаїття форм і розмірів дисків, проєктованих за допомогою запропонованої в підрозділі 2.2 моделі, є значно ширшим, ніж подані в зазначеній частині дисертації та на рис. А.1 і рис. А.2.

А.2. Дводискові сошники

У цьому підрозділі наведено додаткову інформацію стосовно запропонованих прийомів варіантного визначення раціональних конструкційно-експлуатаційних геометричних параметрів і характеристик дводискових сошників та відповідного їхнього комп'ютерного твердотільного формоутворення на стадії ескізного проектування. Зазначені відомості представлено у двох пунктах нижче.

А.2.1. Варіантне моделювання профілів борозни

Математичний апарат формування профілів борозни дводискового сошника в залежності від діаметрів його дисків, кутів їхнього встановлення та глибини механічного обробітку ґрунту викладено в підрозділі 3.2 дисертації. Створену відповідну комп'ютерну програму для системи математичного моделювання Maple подано нижче.

```
restart:
with(plottools): with(plots): with(MTM):
DM:= 300: # діаметр дисків, мм
AL:= 5: # кут  $\alpha$ , градуси
B:= 20: # кут  $\beta$ , градуси
G := 0 # кут  $\gamma$ , градуси
dis:= 0: # зазор між дисками в місці їхнього сходження, мм
XC:= 0: ZC:= 110: # координати осі обертання, мм`
sing:= proc (p) return sin(p/180·Pi) end proc:
cosg:= proc (p) return cos(p/180·Pi) end proc:
f1:=proc (p) return evalf(DM/2·(cosg(AL)·sing(B)·sing(p)-sing(AL)·cosg(p)))
end proc: # координата y
f2:= proc (p) return evalf((XC-DM/2·(cosg(AL)·cosg(p)+sing(AL)·sing(B)
sing(p))) sing(G)+(1-cosg(G)) ZC-DM/2·cosg(B) cosg(G) sing(p)) end proc: #
координата z
```

```
f3:= proc (p) return evalf(DM/2 (cosg(AL) cosg(p)+sing(AL) sing(B) sing(p))
cosg(G)+(1-cosg(G)) XC-(DM/2 cosg(B) sing(p)+ZC) sing(G)) end proc: #
координата x
```

```
up:= 0: uk:= 360: # градуси
```

```
us:= 180·evalf(atan(-cot(AL/180·Pi)·sing(B)))/Pi+180: # градуси
```

```
ys:= f1(us):
```

```
zs := f2(us):
```

```
if G=0 then H:=-evalf(DM/2 cosg(B)) else un:= 180 evalf(atan((sing(AL)
sing(B) sing(G)+cosg(B) cosg(G))/(cosg(AL) sing(G))))/Pi+if(G < 0, 180, 0); H :=
f2(un) end if:
```

```
k := 10: th:= 5: clr:= "blue":
```

```
P1:= plot([f1(u), f2(u)-H, u=up .. uk], scaling=constrained, font= [Times,
roman, 20], view = [floor(-DM/6/k)·k .. ceil((DM/2/k)·k, 0 .. (ceil(DM/3·cosg(B)/k)-1)·k],
gridlines = true, thickness = eval(th), color = clr):
```

```
P2:= plot([2·ys-f1(u)+dis, f2(u)-H, u= up .. uk], scaling = constrained, font
= [Times, roman, 20], view = [floor(-DM/6/k)·k .. ceil((DM/2/k)·k, 0 ..
(ceil(DM/3·cosg(B)/k)-1)·k], gridlines = true, thickness = eval(th), color = clr):
```

```
display(P1, P2)
```

```
zs-H # висота гребеня, мм
```

```
evalf(DM/3·cosg(B)) # максимальна глибина обробітку, мм
```

Деякі результати її роботи, на додаток до приведених у пункті 3.2.2 дисертації, показано на рис. А.3 ... А.5. Перший ілюструє вплив діаметра диска на борозну для поданих на рис. 3.3 прикладів. Зауважимо, що розглядається випадок з мінімальною відстанню $dis=2$ мм між дисками. Як бачимо, зменшення діаметра призводить до відповідної модифікації поперечного перерізу борозни. За таких умов можна отримати небажано малу відстань (рис. А.3 в, г) між рядками для вузькорядної сівби. Для вказаного диска $D=300$ мм останнє виправляється (див. рис. А.4 в, г) збільшенням кута α , але при цьому також зростає профіль борозни.

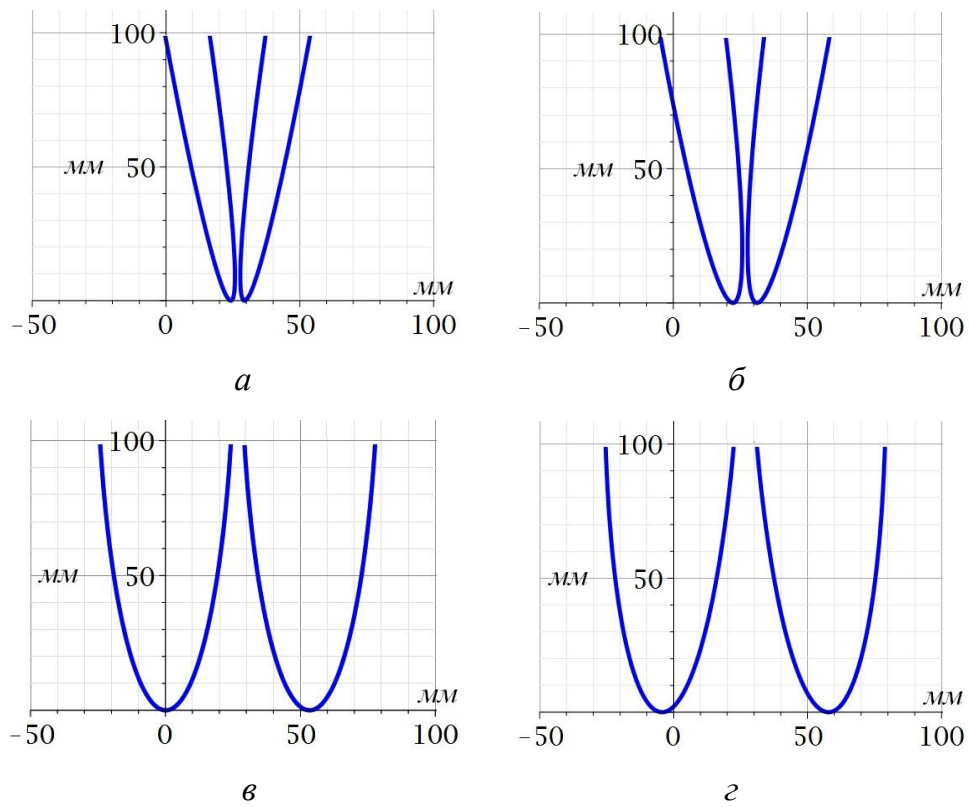


Рис. А.3. Борозна диска $D=300$ мм, $\alpha=7^\circ$, $\beta=7^\circ$, $x_c=0$ мм, $z_c=110$ мм:

$$a - \gamma = -25^\circ; \quad б - \gamma = -15^\circ; \quad в - \gamma = 45^\circ; \quad г - \gamma = 55^\circ$$

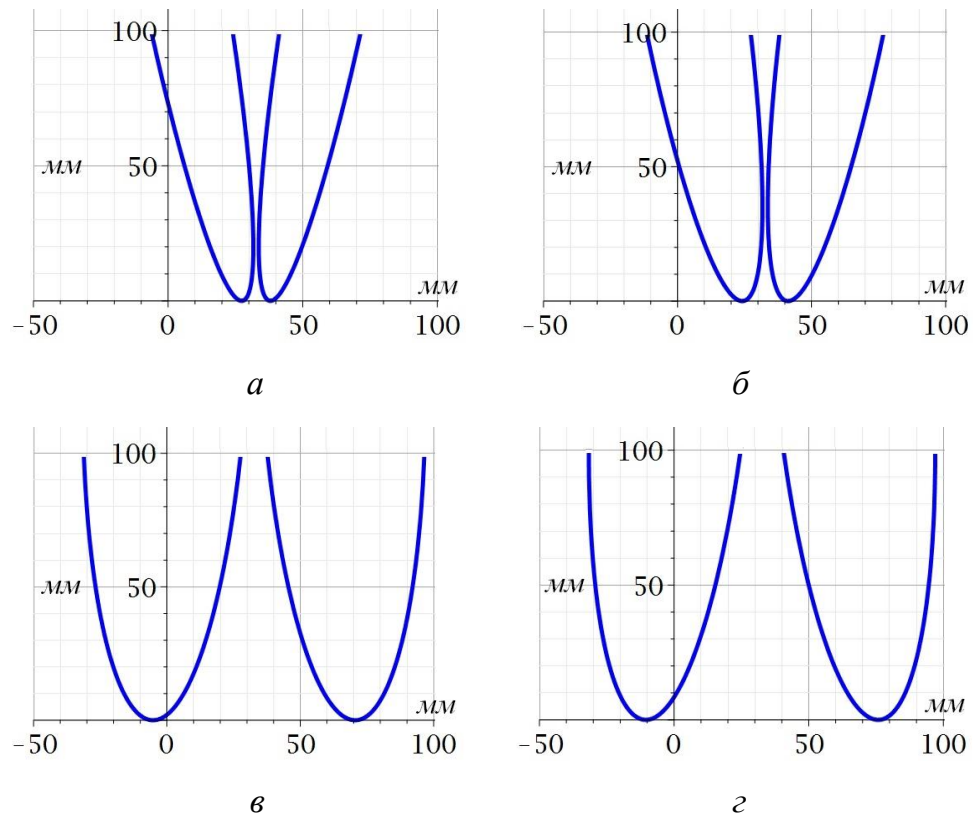


Рис. А.4. Борозна диска $D=300$ мм, $\alpha=10^\circ$, $\beta=7^\circ$, $x_c=0$ мм, $z_c=110$ мм:

$$a - \gamma = -25^\circ; \quad б - \gamma = -15^\circ; \quad в - \gamma = 45^\circ; \quad г - \gamma = 55^\circ$$

Вплив кута β на зображення рис. А.4 відтворює наведений наступний рисунок.

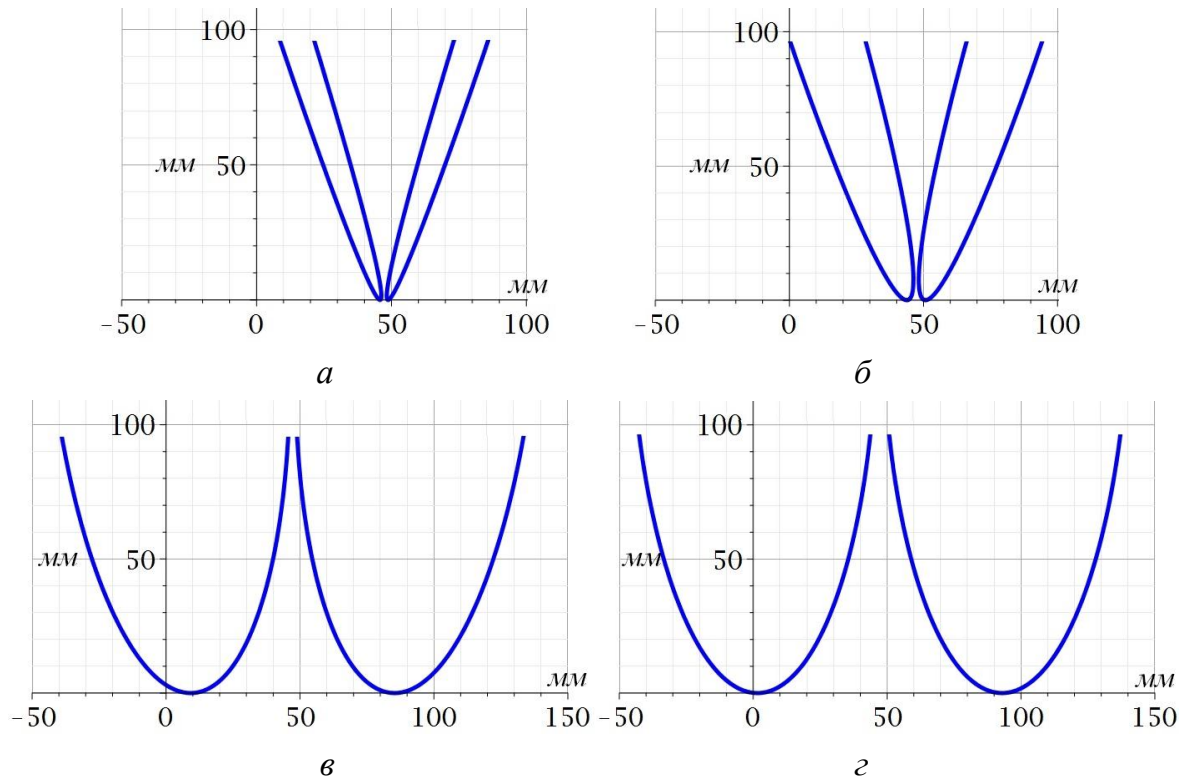


Рис. А.5. Борозна диска $D=300$ мм, $\alpha=10^\circ$, $\beta=15^\circ$, $x_c=0$ мм, $z_c=110$ мм:

$a - \gamma=-25^\circ$; $б - \gamma=-15^\circ$; $в - \gamma=45^\circ$; $г - \gamma=55^\circ$

Видно, що отримувані контури борозни прогнозованим чином змінюються.

У підрозділі 3.3 наведено запропонований математичний апарат для обчислення площ поперечних перерізів борозни сошника в залежності від діаметрів дисків, кутів їхнього встановлення та глибини обробітку ґрунту. Створену відповідну комп'ютерну програму для системи математичного моделювання Maple подано нижче.

restart:

with(plottools): with(plots): with(MTM):

DM:= 350: # діаметр дисків, мм

AL:= 5: # кут α , градуси

B:= 20: # кут β , градуси

dis:= 0: # зазор між дисками в місці їхнього сходження, мм

a := 70: # глибина обробітку, мм`

```

sing:= proc (p) return sin(p/180·Pi) end proc:
cosg:= proc (p) return cos(p/180·Pi) end proc:
f1:=proc (p) return evalf(DM/2·(cosg(AL)·sing(B)·sing(p)-sing(AL)·cosg(p)))
end proc: # координата y
f2:= proc (p) return evalf(-DM/2·cosg(B) sing(p)) end proc: # координата z
f3:= proc (p) return evalf(DM/2 (cosg(AL) cosg(p)+sing(AL) sing(B) sing(p)))
end proc: # координата x
up:= 0: uk:= 360: # градуси
us:= 180·evalf(atan(-cot(AL/180·Pi)·sing(B)))/Pi+180: # градуси
ys:= f1(us):
zs:= f2(us):
H:=-evalf(DM/2 cosg(B)):
k:= 10: th:= 5: clr:= "blue":
P1:= plot([f1(u), f2(u)-H, u=up .. uk], scaling=constrained, font= [Times,
roman, 20], view=[floor(-DM/6/k)·k..ceil((DM/2/k)·k, 0..(ceil(DM/3·cosg(B)/k)-1)·k],
gridlines = true, thickness = eval(th), color = clr):
P2:= plot([2·ys-f1(u)+dis, f2(u)-H, u = up .. uk], scaling = constrained, font =
[Times,roman,20],view=[floor(-DM/6/k)·k..ceil((DM/2/k)·k,0..(ceil(DM/3·cosg(B)/k)-
1)·k], gridlines = true, thickness = eval(th), color = clr):
display(P1, P2)
zs-H # висота гребеня, мм
evalf(DM/3·cosg(B)) # максимальна глибина обробітку, мм
uv:= 180·evalf(asin(1-2·a/(DM·cosg(B)))/Pi) # градуси
usv:= min(us, 180-uv):
P1:= plot([f1(u), f2(u)-H, u=uv .. usv], scaling=constrained, font= [Times,
roman, 20], view = [floor(-DM/6/k)·k .. ceil((DM/2/k)·k, 0 .. (ceil(a/k)+1)·k],
gridlines = true, thickness = eval(th), color = clr):
P2:= plot([2·ys-f1(u)+dis, f2(u)-H, u = uv .. usv], scaling = constrained, font
= [Times, roman, 20], view = [floor(-DM/6/k)·k .. ceil((DM/2/k)·k, 0 ..
(ceil(a/k)+1)·k], gridlines = true, thickness = eval(th), color = clr):

```

if dis = 0 then display(P1, P2) else display(P1, P2, line([ys, zs-H], [ys+dis, zs-H], thickness = eval(th), color = clr)) end if

ALr:=evalf(AL·Pi/180); Br:=evalf((B·Pi/180); uvr:=evalf(·Pi/180); usvr:=evalf(usv·Pi/180):

f5:= proc (p) return evalf(cos(ALr)·sin(Br)·sin(p)) end proc:

f6:= proc (p) return evalf(-sin(ALr)·cos(p)) end proc:

f7:= proc (p) return evalf(-cos(ALr)·sin(Br)·sin(p)·sin(p)/2) end proc:

f8:= proc (p) return evalf(-sin(ALr)·(p/2-sin(2·p)/4)) end proc:

InA:=evalf(DM^2·cos(Br)/4)·(f5(usvr)-f5(uvr)+f6(usvr)-f6(uvr)+f7(usvr)-f7(uvr)+f8(usvr)-f8(uvr)):

yv:= f1(uv):

if us<180-uv then A:=2·((ys-yv)·a-InA+dis/2·(a-zs+H)) else A:=2·((ys-yv)·a-InA) end if

f9:= proc () local Ag, Ing, n, uv, du, i: Ing:=0: n:=1000: uv:=90: du:=(us-uv)/n: for i from 0 by 1 to n-1 do Ing:=Ing+(f2(uv+i·du)+f2(uv+(i+1)·du-2·H)/2·(f1(uv+(i+1)·du)-f1(uv+i·du)) end do: Ag:=2·Ing+dis·(zs-H); print("hg=", zs-H, "Ag=", Ag, " sqrt(A)=", sqrt(Ag)) end proc:

f10:= proc () local uv, yv, P1g, P2g: uv:=90; yv:= f1(uv); P1g:=plot([f1(u), f2(u)-H, u=uv .. us], scaling=constrained, font=[Times, roman, 20], view=[floor(yv) .. floor(yv)+2·(ceil(ys)-floor(yv))+dis, 0..ceil(zs-H)], gridlines=true, thickness=eval(th), color=clr): P2g:=plot([2·ys-f1(u)+dis, f2(u)-H, u=uv .. us], scaling=constrained, font=[Times, roman, 20], view=[floor(yv) .. - floor(yv)+2·(ceil(ys)-floor(yv))+dis, 0 .. ceil(zs-H)], gridlines=true, thickness=eval(th), color=clr): if dis=0 then display(P1g, P2g) else display(P1g, P2g, line([ys, zs-H], [ys+dis, zs-H], thickness=eval(th), color=clr)) end if end proc:

if us<180-uv then f9(): f10(): end if # зрєбїнь

На додаток до перерахованих у підрозділі 3.3 можливостей представлений вище програмний код також забезпечує формування профілю гребеня борозни, обчислення його висоти, площі та сторони однакового за площею квадрата.

На рис. А.6 подано три зображення для випадку $D=400$ мм, $\alpha=5^\circ$, $\beta=10^\circ$. Перше і друге ілюструють профілі борозни відповідно для глибини обробітку максимальної $a_{\max}=131,3$ мм та $a=50$ мм, останнє – демонструє геометрію гребеня.

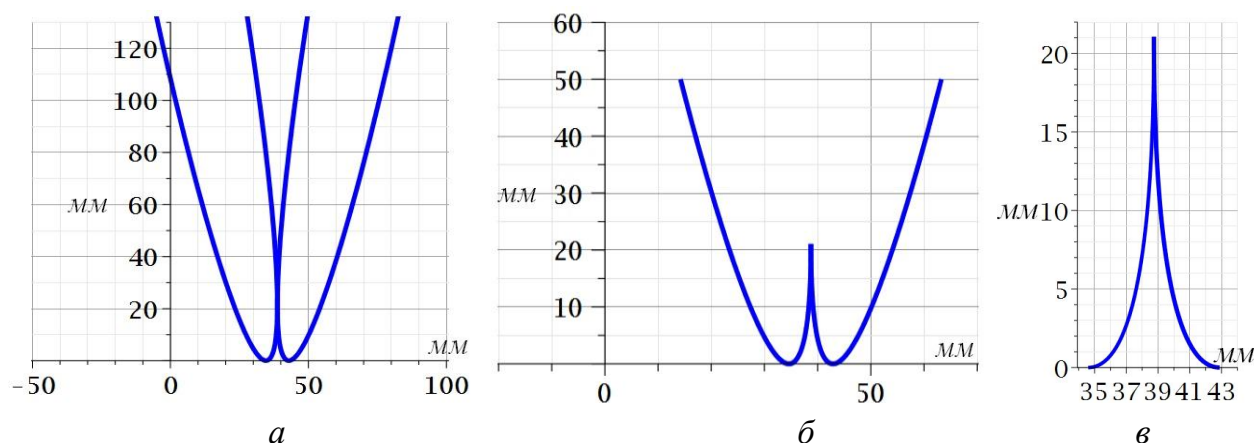


Рис. А.6. Борозна $D=400$ мм, $\alpha=5^\circ$, $\beta=10^\circ$:

a , $б$ – профілі для $a_{\max}=131,3$ мм та $a=50$ мм; $в$ – гребінь

Для глибини обробітку $a=50$ мм площа поперечного перерізу борозни становить $A \approx 1619,5$ мм². При цьому відстані між відповідними точками профілю $b_n \approx 8,3$ мм, $b_{\delta} \approx 49,1$ мм. Висота гребеня $h_{\text{гп}} \approx 21,1$ мм, площа його профілю $A_{\text{гп}} \approx 29,7$ мм² (сторона рівного за площею квадрата $\approx 5,45$ мм). Аналіз геометрії гребеня свідчить, що вище 5 мм його ширина менша 2 мм. Тобто з точки зору практики він фактично зникає. Тоді реальний профіль гребеня можна апроксимувати рівнобедреною трапецією з верхньою основою $b_{\text{гп}\delta} = 2$ мм, висотою $h_{\text{гп}} = 5$ мм та нижньою основою $b_{\text{гп}n}$, яка обчислюється з виразу

$$\frac{b_{\text{гп}\delta} + b_{\text{гп}n}}{2} \cdot h_{\text{гп}} = A_{\text{гп}}. \quad (\text{A.1})$$

На основі залежності (A.1) визначаємо

$$b_{\text{гп}n} = \frac{2 \cdot A_{\text{гп}}}{h_{\text{гп}}} - b_{\text{гп}\delta}. \quad (\text{A.2})$$

З використанням формули (A.2) маємо

$$b_{mp_n} = \frac{2 \cdot 29,7 \text{ мм}^2}{5 \text{ мм}} - 2 \text{ мм} = 9,88 \text{ мм}.$$

Розглянутий гребінь за потреби видаляється додатковими засобами, які, однак, не становлять предмет досліджень даної дисертації. Акцентуємо наступний корисний у певних обставинах момент. Він полягає в тому, що для проаналізованого випадку (див. рис. А.6 а), до висоти 50 ... 60 мм існує ділянка малої площі над дисками. Зазначене можна застосовувати для спрощення конструкції сошників.

Зупинимось ще на такому важливому для практики питанні, як найменша відстань між дисками. Зазвичай її прагнуть мінімізувати. Напрацьований математичний апарат і представлена вище комп'ютерна програма дозволяють оцінити вказані аспекти. Проілюструємо це на попередніх даних, використавши додатково величину $d_s=2 \text{ мм}$. Отримані результати показано на рис. А.7.

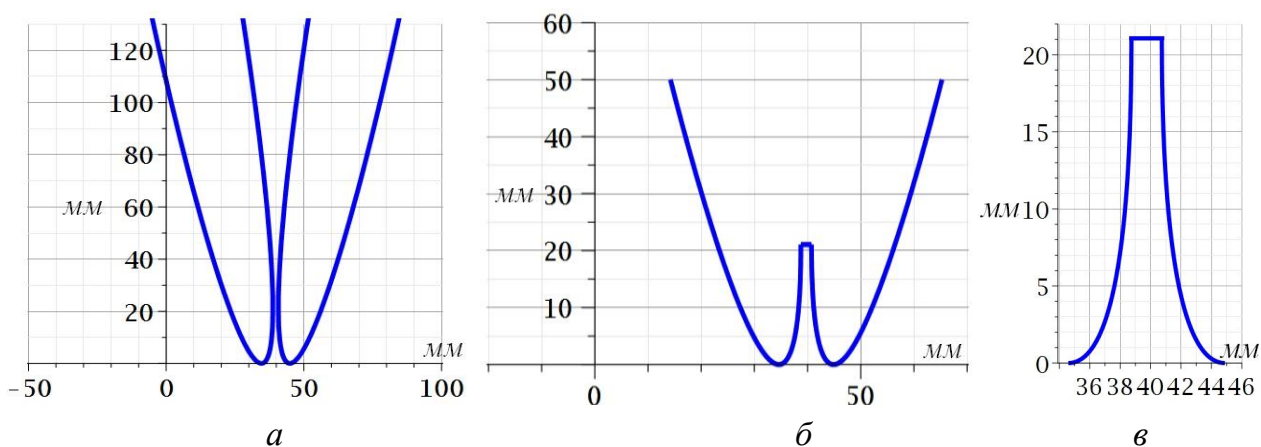


Рис. А.7. Борозна $D=400 \text{ мм}$, $\alpha=5^\circ$, $\beta=10^\circ$, $d_s=2 \text{ мм}$:

$a, б$ – профілі для $a_{\max}=131,3 \text{ мм}$ та $a=50 \text{ мм}$; $в$ – гребінь

Порівняно з попереднім рисунком наявні зміни стосуються збільшення мінімальної відстані між дисками (див. рис. А.7 а) до 2 мм, а також досягнення площі профілю борозни значення $A \approx 1677,3 \text{ мм}^2$. При цьому дистанції між відповідними точками профілю $b_n \approx 10,3 \text{ мм}$ і $b_e \approx 51,1 \text{ мм}$. Практичне осипання гребеня враховано на висоті мінімальної відстані між дисками (рис. А.7 б). Тоді його, за попередньо викладеною методикою, можна апроксимувати рівнобедреною трапецією. На підставі цього

$$b_{mp_n} = \frac{2 \cdot A_{ep}}{h_{mp}} - b_{mp_e} = \frac{2 \cdot 71,9 \text{ мм}^2}{21,1 \text{ мм}} - 2 \text{ мм} \approx 4,815 \text{ мм}.$$

Якщо ж осипання гребеня відбудеться до висоти $h_{mp}=10$ мм, то $b_{mp_e} \approx 2,8$ мм, а

$$b_{mp_n} = \frac{2 \cdot A_{ep}}{h_{mp}} - b_{mp_e} = \frac{2 \cdot 71,9 \text{ мм}^2}{10 \text{ мм}} - 2,8 \text{ мм} = 11,58 \text{ мм}.$$

Реальна поведінка гребеня залежить від багатьох факторів і тому потребує проведення окремих досліджень.

Таким чином, нами додатково до поданих у підрозділах 3.2 і 3.3 відомостей продемонстровано ефективність запропонованого математичного апарату для керування конструкційно-експлуатаційними параметрами й характеристиками дводискових сошників та здійснення їхньої оптимізації. Це дозволяє продуктивно адаптуватися до різноманітних існуючих умов сільсько-господарського виробництва.

Зауважимо, що викладені прийоми моделювання здатні охоплювати також інші сфери життєдіяльності людей. Наприклад, це стосується прокладання у ґрунті певних комунікацій, внесення до нього різноманітних речовин, у тому числі й вибухових, і т. д. Проте окреслені напрямки виходять за рамки тематики дисертації і становлять предмет подальших відповідних наукових розвідок.

А.2.2. Комп'ютерне конструювання

У цьому пункті додатків представлено деякі концептуальні варіанти комп'ютерних твердотільних моделей конструкції дводискових сошників на стадії ескізного проєктування.

Рис. А.8 і рис. А.9 ілюструють різновиди цих знарядь без регулювального кронштейна, а рис. А.10 та рис. А.11 – з ним. На першому вказаному рисунку у правій верхній частині, для забезпечення наочності, показано збільшений фрагмент стояка сошника, а на другому – деякі інші опрацьовувані проєктні

зразки з наведеними величинами конструкційних параметрів. Так, зокрема, рис. А.9 б відповідає експлуатаційним характеристикам, проаналізованим на рис. А.7.

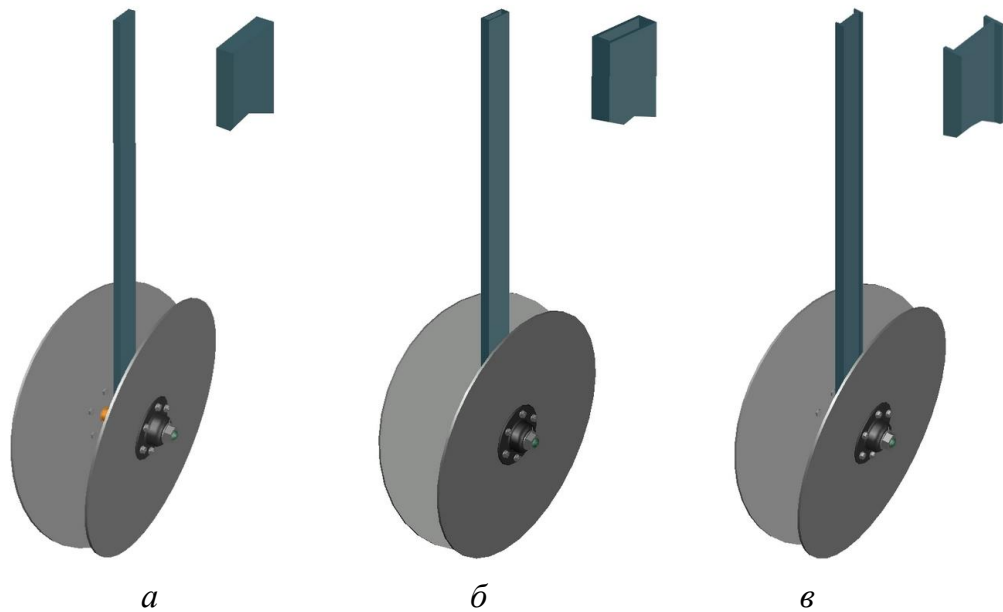


Рис. А.8. Варіанти з різними стояками:

a – прямокутним; *б* – трубчастим; *в* – двотавровим

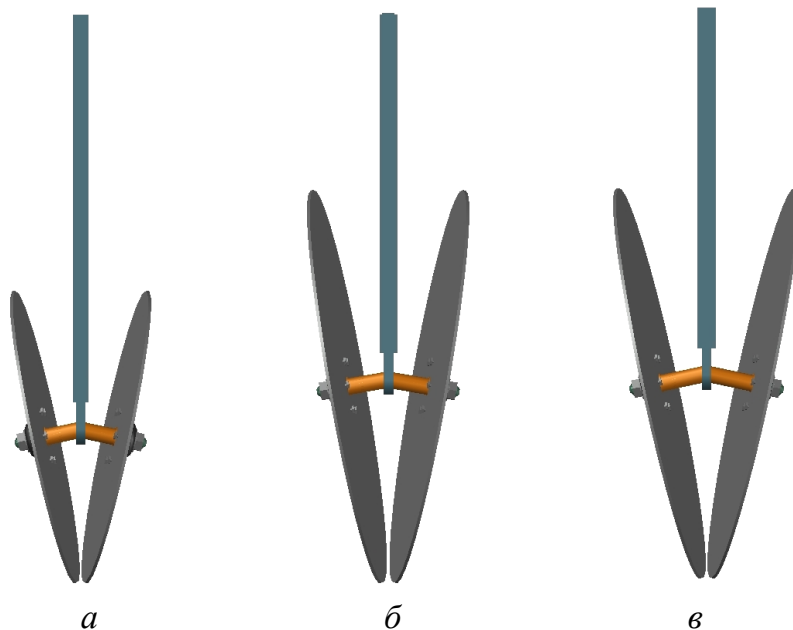


Рис. А.9. Проектні різновиди:

a – $D=300$ мм, $\alpha=5^\circ$, $\beta=12^\circ$; *б* – $D=400$ мм, $\alpha=5^\circ$, $\beta=10^\circ$;

в – $D=400$ мм, $\alpha=5^\circ$, $\beta=12^\circ$

Рис. А.10 містить твердотільні комп'ютерні моделі, які відповідають випадкам, поданим на рис. А.4 *a*, *б* та рис. А.5 *б*. На рис. А.11 представлені

розглянуті на рис. А.4 з і рис. А.5 з варіанти, отримані завдяки належному налаштуванню регулювального кронштейна базових сошників рис. А.10 а та рис. А.10 в.

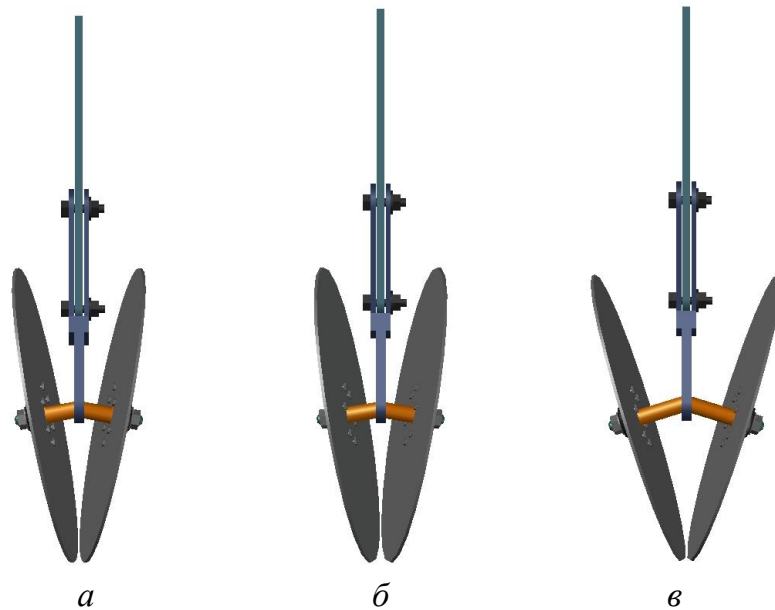


Рис. А.10. Сошники з регулювальним кронштейном, $x_c=0$ мм, $z_c=110$ мм:

а – $D=300$ мм, $\alpha=10^0$, $\beta=7^0$, $\gamma=-25^0$; *б* – $D=300$ мм, $\alpha=10^0$, $\beta=7^0$, $\gamma=-15^0$;

в – $D=300$ мм, $\alpha=10^0$, $\beta=15^0$, $\gamma=-15^0$

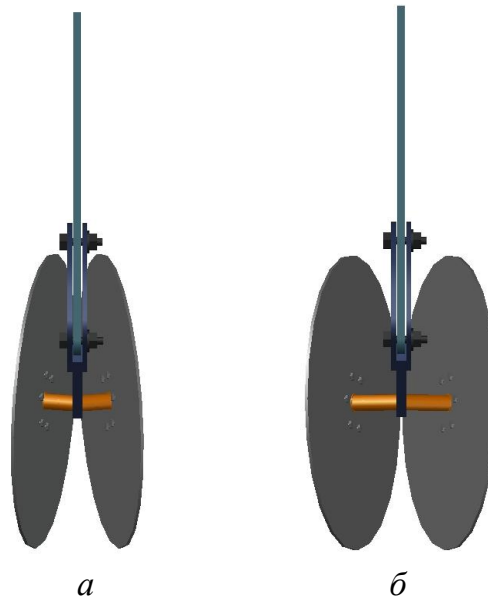


Рис. А.11. Засоби для вузькорядної сівби, $x_c=0$ мм, $z_c=110$ мм:

а – $D=300$ мм, $\alpha=10^0$, $\beta=7^0$, $\gamma=55^0$; *б* – $D=300$ мм, $\alpha=10^0$, $\beta=15^0$, $\gamma=55^0$

Рис. А.12 та рис. А.13 ілюструють застосування неплоских дисків у ґрунтообробних знаряддях, виконаних за схемою проаналізованого сошника. При цьому їхнє призначення може бути доволі різноманітним. Але на ньому

зупинятися не будемо, оскільки вказане питання виходить за рамки предмета даних досліджень. Головна мета полягає тільки в окресленні перспектив подальших наукових розвідок.

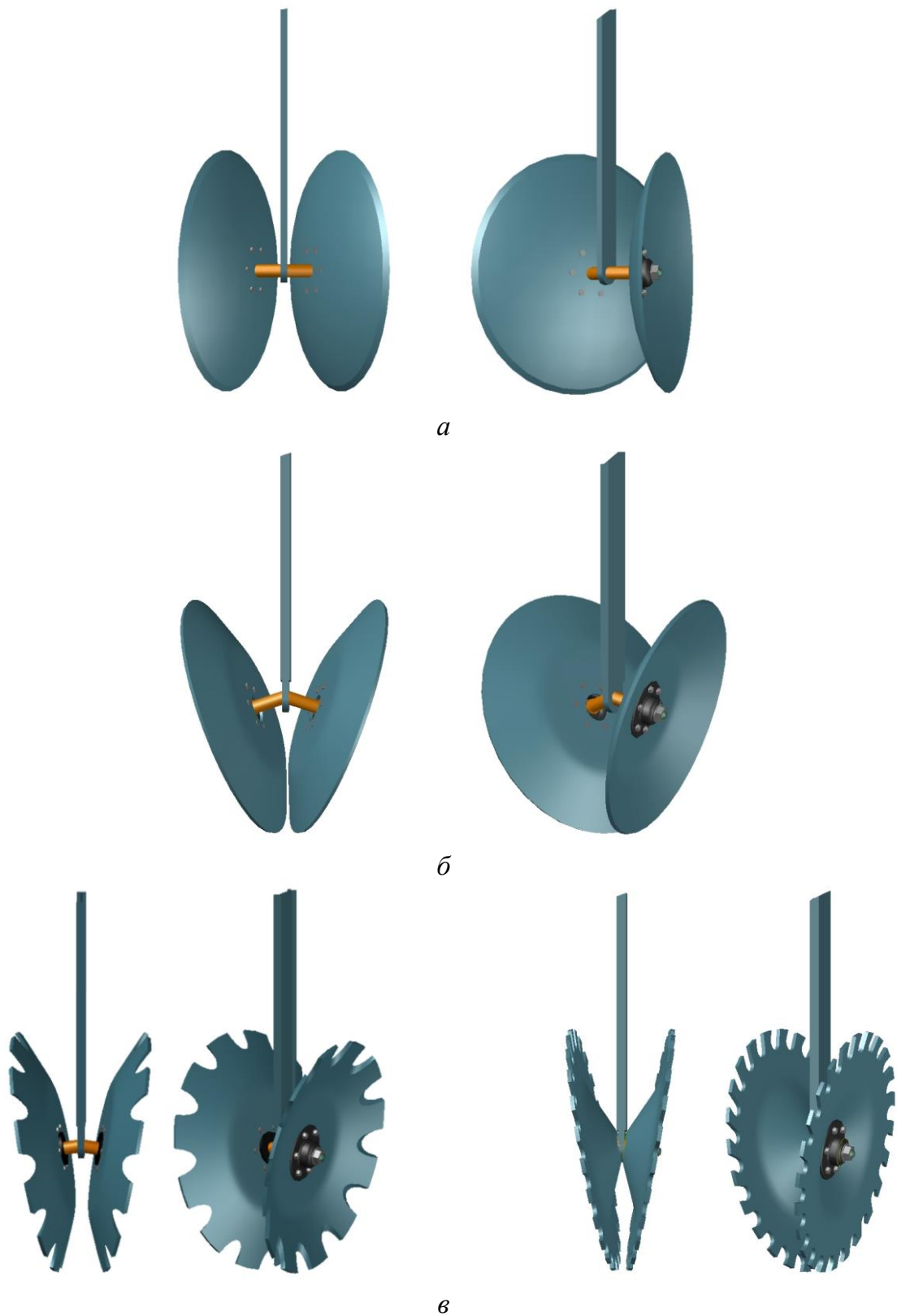


Рис. А.12. Знаряддя без регульованого кронштейна з дисками:

a – сферичними; *б* – тарілкоподібними; *в* – з вирізами дугами кіл та асиметричними

Приведені вироби представлені ортогональною та аксонометричною проєкціями. Для забезпечення компактності зображень стояки на них обмежені за висотою. Знаряддя рис. А.12 *а, б* здатні певним чином виконувати роль підгортачів, які розглянуті в четвертому розділі дисертації, а наведені на рис. А.12 *в* – ефективно подрібнювати на полі рослинні рештки.

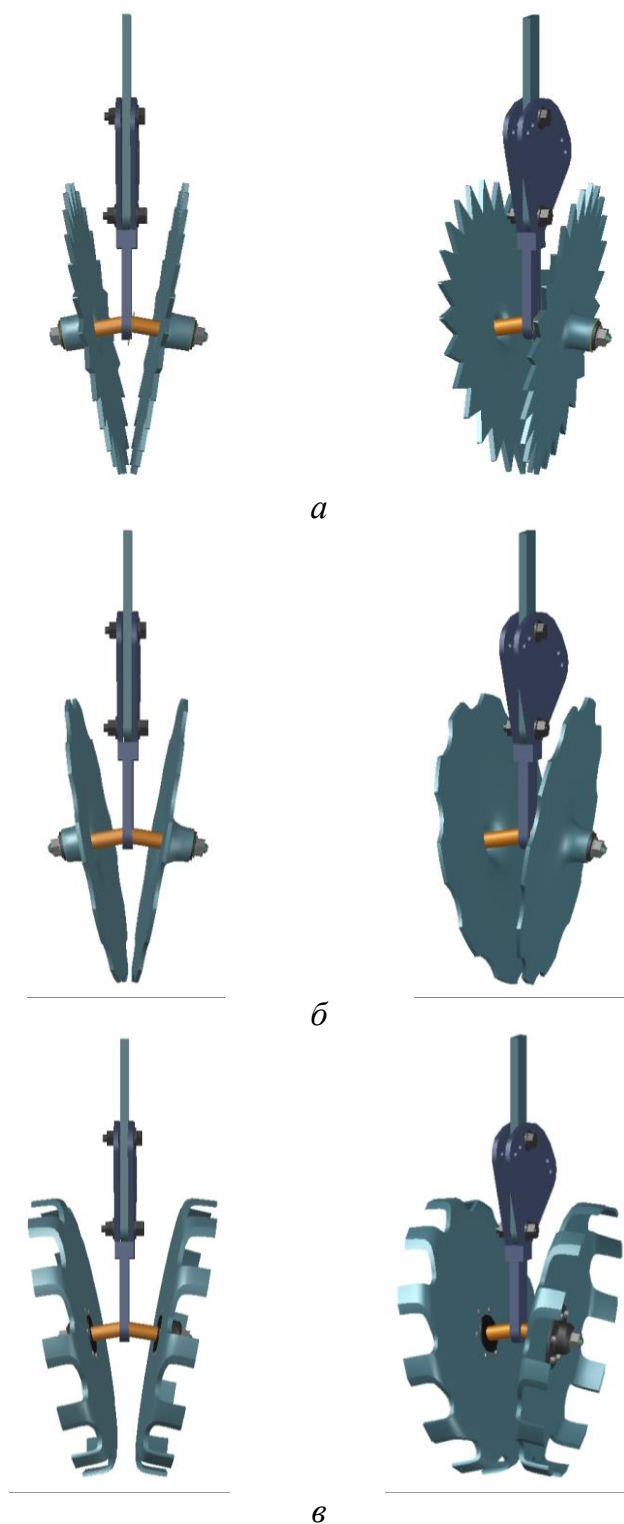


Рис. А.13. Знаряддя з регульованим кронштейном та дисками з вирізами:

а – трикутними, *б* – дугами кіл; *в* – асиметричними

Вирізи, показані на рис. А.13 *а, б*, забезпечують легше заглиблення дисків у ґрунт, а подані на рис. А.13 *в* – краще зрізують бур'яни.

Таким чином, у цьому пункті додатків продемонстровано деякі концептуальні варіанти комп'ютерних твердотільних моделей конструкції дводискових сошників та подібних до них ґрунтообробних знарядь на стадії їхнього ескізного проектування.

А.3. Дискові підгортачі

У даній частині дослідження представлено створену програму для системи математичного моделювання Maple, яка будує профілі борозни та розраховує їхні площі для опрацьовуваних у четвертому розділі дисертації дискових підгортачів. Також наведені деякі комп'ютерні твердотільні моделі зазначених ґрунтообробних знарядь.

А.3.1. Профілі борозни

Цей пункт містить розроблену для середовища системи Maple комп'ютерну програму. Вона формує для дискових підгортачів профілі борозни та обчислює їхні площі. Вихідними параметрами є діаметр D дисків із радіусом R сферичної поверхні, кут α їхнього повороту навколо вертикальних осей, відстань B між останніми, деякі конструкційно-експлуатаційні особливості даного знаряддя та глибина a обробітку ґрунту. Лістинг програми викладено нижче.

restart:

with(plottools): with(plots): with(MTM):

DM:=350: # діаметр дисків, мм

R:=350: # радіус сферичної поверхні, мм

Hsf:=evalf(R-sqrt(R^2-DM^2/4) # висота сферичного сегмента, мм

Lkns:=60: # конструкційна складова відстані до осі обертання диска, мм

L:=ceil(Hsf+Lkns) # відстань від осі обертання стояка до основи

```

сферичного сегмента на виді зверху, мм
B:=450: # відстань між осям обертання стояків на виді зверху, мм
ALmin:=180·evalf(asin(DM·2/R))/Pi # min кут α, градуси
AL:=30: # кут α, градуси
if evalf(L·cos((AL·Pi/180)+DM·sin(AL·Pi/180)/2)>=B/2 then print("Великий
кут AL") end if
a:=100: # глибина обробітку, мм
sing := proc (p) return sin(p·Pi/180) end proc:
cosg := proc (p) return cos(p·Pi/180) end proc:
f1:= proc (p) return evalf(DM·sing(AL)·cosg(p)/2+L·cosg(AL)) end proc: #
координата у
f2:= proc (p) return evalf(-DM·sing(p)/2) end proc: # координата z
f3:= proc (p) return evalf(DM·cosg(AL)·cosg(p)/2-L·sing(AL)) end proc: #
координата x
up:=0: uk:= 360: # градуси
Bn:=evalf(B-2·L·cosg(AL)) # мм
uv:=180·evalf(asin(1-2·a/DM))/Pi: # градуси
B1:=evalf(B-DM·sing(AL)·cosg(uv)-2·L·cosg(AL)) # мм
B2:= evalf(B+DM·sing(AL)·cosg(uv)-2·L·cosg(AL)) # мм
B3:= evalf(B-2·L·cosg(AL)+DM·sing(AL)) # мм
H:=-evalf(DM/2):
k:=10: th:=5: clr:="blue":
P1:=plot([f1(u),f2(u)-H,u=up..uk],scaling=constrained,font=[Times,roman,20],
view=[floor(-DM/2/k)·k .. ceil((B+DM/2)/k)·k, 0 .. ceil(DM/3/k)·k], gridlines=true,
thickness=eval(th),color=clr):
P1P:=plot([f1(u),f2(u)-H,u=up..uk],scaling=constrained,font=[Times,roman,20],
view=[floor(-DM/2/k)·k..ceil((B+DM/2)/k)·k,0..ceil(DM/k)·k],gridlines=true,thickness=
eval(th),color=clr):

```

```
P2:=plot([B-f1(u),f2(u)-H,u=up..uk],scaling=constrained,font=[Times,roman,20],
view=[floor(-DM/2/k)·k .. ceil((B+DM/2)/k)·k, 0 .. ceil(DM/3/k)·k], gridlines=true,
thickness=eval(th),color=clr):
```

```
display(P1P, P2) # повні диски
```

```
display(P1, P2) # максимальна глибина обробітку
```

```
uv2 := 180-uv:
```

```
P1:=plot([f1(u),f2(u)-H,u=uv..uv2],scaling=constrained,font=[Times,roman,20],
view=[floor(-DM/2/k)·k .. ceil((B+DM/2)/k)·k, 0..(ceil(a/k)+1)·k], gridlines=true,
thickness=eval(th),color=clr):
```

```
P2:=plot([B-f1(u),f2(u)-H,u=uv..uv2],scaling=constrained,font=[Times,roman,20],
view=[floor(-DM/2/k)·k .. ceil((B+DM/2)/k)·k, 0..(ceil(a/k)+1)·k], gridlines=true,
thickness=eval(th),color=clr):
```

```
display(P1, P2) # глибина обробітку a
```

```
ALr:=evalf(AL·Pi/180): uvr:=evalf(uv·Pi/180): uv2r:= evalf(uv2·Pi/180):
```

```
f5 := proc (p) return evalf(cos(p)) end proc:
```

```
f6 := proc (p) return evalf((2·p-sin(2·p))/4) end proc:
```

```
InA:=evalf(DM^2·sin(ALr)/4·(f5(uvr)-f5(uv2r)+f6(uvr)-f6(uv2r)):
```

```
A:=2·((f1(uv)-f1(uv2))-a-InA) # площа профілю борозни, мм2
```

Подану програму використано під час побудов рис. 4.8 ... 4.14 та заповнення табл. 4.2 ... 4.5.

А.3.2. Комп'ютерне твердотільне конструювання

У цьому пункті представлено комп'ютерну твердотільну модель підгортача, яка доповнює розглянуті в підрозділі 4.3 дисертації. На рис. А.14 показано різновид знаряддя для одночасного обробляння шести рядків, який створений на основі наведеного у вказаному підрозділі варіанта 3 шляхом додавання потрібних дисків. Зображення рис. 4.14 а ілюструє глибину обробітку $a=50$ мм, а рис. 4.14 б, в – $a=100$ мм. Два останні випадки різняться відстанню h від землі до рами конструкції. Це здійснено з метою врахування

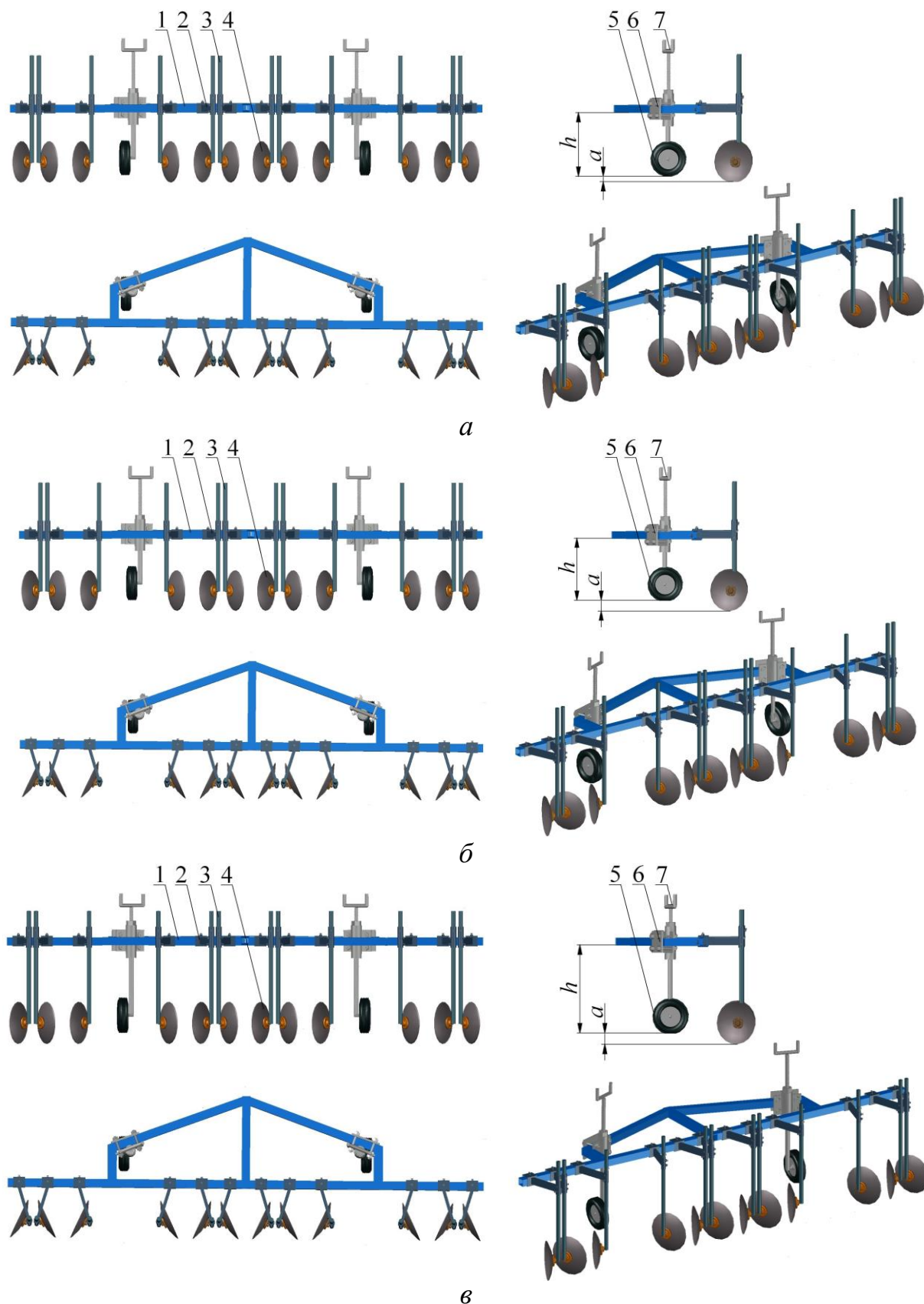


Рис. А.14. Варіант 4 конструкції підгортача:

$a - a=50 \text{ мм}$, б, в – $a=100 \text{ мм}$

1 – рама; 2 – кріпильний кронштейн; 3 – стояк з віссю;

4 – диск із маточиною та вальницею; 5 – опорне колесо;

6 – кріпильний кронштейн опорного колеса; 7 – регулювальний гвинт

наявної висоти рослин, які підгортаються. Реалізовано за допомогою кріпильних кронштейнів 2 і 6 та регульовального гвинта 7. Отже, складова 2 використовується не тільки для визначення проаналізованих у четвертому розділі необхідної ширини міжрядь і глибини обробітку, а й висоти розташування рами підгортача над землею. За описаними прийомами здійснюється комп'ютерне моделювання й інших схожих сільсько-господарських ґрунтообробних знарядь. Запропонований підхід може бути корисним також і в інших галузях життєдіяльності, наприклад, при розмежуванні територій, створенні протипожежних смуг тощо.

А.4. Отримані патенти

У рамках виконання даного дисертаційного дослідження здобувачем у співавторстві з колегами кафедри нарисної геометрії, інженерної та комп'ютерної графіки Національного технічного університету України «Київський одержано два патенти. Перший на винахід стосовно гнучкого маніпулятора з дистанційним керуванням, а другий – на корисну модель щодо гнучкої стовби дводискового сошника з дистанційним керуванням. Актуальність вирішених питань полягає в тому, що вони сприяють реалізації процесів роботизації. Патент на винахід доволі універсальний, оскільки може застосовуватися в багатьох сферах життєдіяльності, зокрема, промисловості, військовій справі, при проведенні рятувальних операцій, у побуті тощо. Це підтверджує патент на корисну модель у галузі сільського господарства на прикладі гнучкої стовби дводискового сошника з дистанційним керуванням. Запропонований гнучкий маніпулятор також придатний для використання у складі культиваторів, сівалок, коренезбиральних машин і т. д. для роботизації різноманітних агротехнічних процесів.

Скановані копії деяких фрагментів отриманих патентів показано на чотирьох наступних аркушах.





УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **129477** (13) **C2**
(51) МПК**B25J 9/06** (2006.01)**B25J 9/08** (2006.01)**B25J 18/06** (2006.01)

НАЦІОНАЛЬНИЙ ОРГАН
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ВЛАСНОСТІ
ДЕРЖАВНА ОРГАНІЗАЦІЯ
"УКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ
ОФІС ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ ТА ІННОВАЦІЙ"

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА ВИНАХІД**(21)** Номер заявки: **а 2022 02069****(22)** Дата подання заявки: **17.06.2022****(24)** Дата, з якої є чинними
права інтелектуальної
власності: **08.05.2025****(41)** Публікація відомостей
про заявку: **20.12.2023, Бюл.№ 51****(46)** Публікація відомостей
про державну
реєстрацію: **07.05.2025, Бюл.№ 19****(72)** Винахідник(и):

**Ванін Володимир Володимирович (UA),
Воробйов Олексій Миколайович (UA),
Лазарчук-Воробйова Юлія Валентинівна
(UA),
Голова Ольга Олександрівна (UA),
Луданов Денис Костянтинович (UA),
Залевський Сергій Володимирович (UA),
Яблонський Петро Миколайович (UA)**

(73) Володілець (володільці):

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ "КИЇВСЬКИЙ
ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ
СІКОРСЬКОГО",
просп. Перемоги, 37, м. Київ-56, 03056 (UA)**

(56) Перелік документів, взятих до уваги
експертизою:

**RU 2527559 C2, 10.09.2014
RU 2403145 C2, 10.11.2010
US 9113663 B2, 25.08.2015
CA 2773839 A1, 30.09.2013
CN 108481305 A, 04.09.2018
US 10636555 B2, 28.04.2020
US 4751821 A, 21.06.1988**

UA 129477 C2**(54) ГНУЧКИЙ МАНІПУЛЯТОР З ДИСТАНЦІЙНИМ КЕРУВАННЯМ****(57)** Реферат:

Гнучкий маніпулятор з дистанційним керуванням містить ланцюг послідовно з'єднаних між собою взаємодіючих рухомих елементів, кожен з яких має корпус з діелектричного матеріалу чашоподібної форми зі сферичною опуклою частиною зі сторони попереднього елемента та випуклою зі сторони наступного, пелюсткові сегменти і осьовий отвір. Робочі поверхні цих елементів, що взаємодіють з наступним елементом, містять металеві пластини, а робочі поверхні, що взаємодіють з попереднім, – електромагніти. На сторонах сферичних частин корпусу елементів передбачені сферичні контакти. Всередині корпусу елементів розміщено блок керування, що містить блок живлення, мікропроцесор, мікроконтролери у кількості, що відповідає кількості пелюсткових сегментів, і модуль прийому бездротового сигналу. По центру корпусу кожного з елементів розміщено осьові отвори, з кожної сторони яких розміщені конічні отвори. В осьових отворах встановлено контактні втулки, через які проходить металевий трос. За допомогою контактної втулки через трос разом із сферичними контактами подається електроживлення на блок керування, а через блок керування - на електромагніти.



(11) **161479**(19) **UA**(51) МПК
A01C 7/16 (2006.01)(21) Номер заявки: **u 2025 02010**(22) Дата подання заявки: **01.05.2025**(24) Дата, з якої є чинними
права інтелектуальної
власності: **11.12.2025**(46) Дата публікації відомостей
про державну реєстрацію
та номер Бюлетеня: **10.12.2025,
Бюл. № 50**

(72) Винахідники:

**Воробйов Олексій
Миколайович, UA,
Вірченко Геннадій
Анатолійович, UA,
Волоха Микола Петрович,
UA,
Яблонський Петро
Миколайович, UA,
Лазарчук-Воробйова Юлія
Валентинівна, UA,
Голова Ольга
Олександрівна, UA,
Залевський Сергій
Володимирович, UA,
Лазарчук Маргарита
Валентинівна, UA,
Воробйов Олексій
Олексійович, UA**

(73) Володілець:

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
"КИЇВСЬКИЙ
ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО",
просп. Берестейський, 37, м.
Київ, 03056, UA**

(54) Назва корисної моделі:

ГНУЧКА СТОВБА ДВОДИСКОВОГО СОШНИКА З ДИСТАНЦІЙНИМ КЕРУВАННЯМ

(57) Формула корисної моделі:

1. Гнучка стовба дводискового сошника з дистанційним керуванням, що містить ланцюг послідовно з'єднаних між собою взаємодіючих рухомих елементів, корпус кожного з яких виконаний з діелектричного матеріалу та на кожному з яких розміщені електромагніти і металеві пластини, рухомі елементи з'єднані у такий спосіб, що утворюються внутрішня робоча поверхня, що взаємодіє з наступним рухомих елементом, і зовнішня робоча поверхня, що взаємодіє з попереднім рухомих елементом, кожен рухомий елемент містить блок керування, що містить блок живлення, мікропроцесор, мікроконтролери і модуль прийому бездротового сигналу, і блок керування виконаний з можливістю отримання керуючого сигналу через модуль прийому бездротового сигналу, причому керування електромагнітами здійснене подаванням електроживлення від блока керування, також кожен рухомий елемент містить провідник струму від попереднього рухомих елемента до наступного, яка **відрізняється** тим, що корпус кожного рухомих елемента має V-подібну форму, утворену V-подібною зовнішньою частиною зі сторони попереднього рухомих елемента та V-подібною внутрішньою частиною - зі сторони наступного, рухомі елементи виконані з можливістю руху в одній площині і з'єднані між собою засобами, що придатні для створення роз'ємних з'єднань, при цьому на внутрішніх робочих поверхнях кожного з рухомих елементів розміщені електромагніти, а на зовнішніх - металеві пластини, роль провідника струму від попереднього рухомих елемента до наступного виконують розташовані всередині корпусу дві контактні пластини, блок керування розміщений на зовнішній робочій поверхні кожного рухомих елемента.

2. Гнучка стовба за п. 1, яка **відрізняється** тим, що як засоби, придатні для створення роз'ємних з'єднань, використано болти, гвинти, шпильки.

ДОДАТОК Б

ДОКУМЕНТИ ПРО ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

Напрацьовані в дисертації наукові положення, методи, способи, прийоми та методики моделювання дискових знарядь для механічного обробітку ґрунту впроваджено:

- у фермерському господарстві «Росток» Кіровоградської області Уляновського району Кам'янобрідської сільської ради під час належних лабораторно-польових експериментальних досліджень;
- у навчальний процес Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» у вигляді методик автоматизованого варіантного моделювання технічних об'єктів машинобудування під час викладання дисципліни «Інженерна та комп'ютерна графіка».

Акти про впровадження результатів дисертації наведено на наступних двох аркушах.

УКРАЇНА
 Кіровоградська область
 Ульяновський район
 Кіровоградська сільська рада
 СЕЛЯНСЬКЕ ГОСПОДАРСТВО
 „РОСТОК”
 № 356
 14 липня 2005 р.

ЗАТВЕРДЖУЮ:
 Керівник ФГ «Росток»

 Світлана АВДЕЄВА

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

результатів досліджень здобувача наукового ступеня доктора філософії

Воробйова Олексія Миколайовича,

старшого викладача Національного технічного університету України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

за темою дисертаційної роботи «Моделювання конструкційно-експлуатаційних
 геометричних параметрів і характеристик дискових знарядь
 для механічного обробітку ґрунту»

Фермерське господарство «Росток» підтверджує наступні основні результати
 лабораторно-польових експериментальних досліджень здобувача Воробйова О.М.:

- вдосконалення конструкції стовби сошника сівалки, що полягає у можливості
 налаштування глибини і ширини посівної борозни та кута нахилу її бокових стінок
 відповідно до розмірів насіння, забезпечило проведення якісного висіву різного за
 розмірами насіння ячменю і кукурудзи без додаткових, передбачених заводськими
 інструкціями налаштувань;

- регулювання кутів кришення і зсуву поверхневого шару ґрунту дисками
 сошника розробленої конструкції при сівбі кукурудзи забезпечує розрахункову
 економію пального до 0,15 л/га залежно від ґрунтово-кліматичних умов та глибини
 заробки насіння;

- покращення рівномірності глибини загортання насіння та ущільнення дна
 посівної борозни (насінневого ложа) запропонованим пристроєм, що викликає підтік
 вологи та поживних речовин до насіння знизу, забезпечило підвищення польової
 схожості ячменю на 2,5 %, кукурудзи – на 3 % у порівнянні з серійною сівалкою СЗ
 - 3,6А.



Представник
 ФГ «Росток»:

Головний заправ



Авдеєв В. М.

Представник

НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського»:

Здобувач



Воробйов О. М.



УКРАЇНА
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
(КПІ ім. Ігоря Сікорського)
ФІЗИКО-МАТЕМАТИЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ

03056, м. Київ, пр-т Берестейський, 37, тел. (+36 044) 204-82-51, e-mail: fmf@kpi.ua

11.02.2025 № 06

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Декан фізико-математичного
факультету

КПІ ім. Ігоря Сікорського

Віталій КОТОВСЬКИЙ

« 11 » 02 2025 року

АКТ

впровадження результатів дисертації «Моделювання конструкційно-експлуатаційних геометричних параметрів і характеристик дискових знарядь для механічного обробітку ґрунту» Воробйова Олексія Миколайовича, виконаної для здобуття наукового ступеня доктора філософії

Комісія у складі:

Голова – завідувач кафедри нарисної геометрії, інженерної та комп'ютерної графіки, д.т.н., проф. Вірченко Г. А.;

Члени комісії:

Волоха М. П. – професор кафедри нарисної геометрії, інженерної та комп'ютерної графіки, д.т.н., с.н.с.;

Голова О. О. – доцент кафедри нарисної геометрії, інженерної та комп'ютерної графіки, к.т.н., доцент

цим Актом засвідчуємо, що результати наукових досліджень Воробйова О. М., ст. викладача кафедри нарисної геометрії, інженерної та комп'ютерної графіки фізико-математичного факультету КПІ ім. Ігоря Сікорського, використовуються у вигляді запропонованих ним узагальнених інваріантних методик комп'ютерного геометричного моделювання технічних об'єктів під час викладання дисципліни «Інженерна та комп'ютерна графіка».

Голова комісії

д.т.н., професор

Члени комісії

д.т.н., с.н.с.

к.т.н., доцент

Геннадій ВІРЧЕНКО

Микола ВОЛОХА

Ольга ГОЛОВА

ДОДАТОК В

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

*Статті у періодичних наукових виданнях, проіндексованих
у базі даних Scopus*

1. Yablonskyi, P., Rogovskii, I., Sobczuk, H., Virchenko, G., Volokha, M., & Vorobiov, O. (2024). Computational approach to geometric modelling of plow bodies. *Journal of Engineering Sciences*, 11(1), E9–E18. URL: [https://www.doi.org/10.21272/jes.2024.11\(1\).e2](https://www.doi.org/10.21272/jes.2024.11(1).e2) (фахове видання категорії А, спеціальність «131 Прикладна механіка»). Особистий внесок авторів: Yablonskyi P. – розроблено математичний апарат комп’ютерного варіантного геометричного моделювання відвалів плугів; Rogovskii I. – запропоновано як об’єкт досліджень геометричне моделювання плугів; Sobczuk H. – опрацьовано питання адаптації до змінних умов проєктування робочих поверхонь; Virchenko G. – визначено мету досліджень щодо створення гнучких, продуктивних та універсальних засобів для автоматизованого формоутворення ґрунтообробних знарядь; Volokha M. – дефініція критеріїв ефективного формоутворення відвалів плугів; Vorobiov O. – аналіз досліджень і публікацій стосовно моделювання робочих поверхонь знарядь для механічного обробітку ґрунту, показано перспективність комп’ютерного варіантного формоутворення для їхнього раціонального проєктування.

Статті у наукових фахових виданнях України

2. Nikolayenko, S., Virchenko, G., Volokha, M., Vorobiov, O., & Lazarchuk-Vorobiova, Y. (2025). Improving energy efficiency of double-disc coulters using boundary estimation method of seed furrow profile influence. *Machinery & Energetics*, 16(3), 20–32. URL: <https://doi.org/10.31548/machinery/3.2025.20> (фахове видання категорії А, спеціальність «131 Прикладна механіка»). Особистий внесок авторів: Nikolayenko S. – обґрунтовано актуальність наукових досліджень стосовно підвищення енергоефективності сільськогосподарських знарядь; Virchenko G. – визначено головну ідею напрацьованого методу щодо

взяття за основу для подальшої оптимізації наявного досвіду експлуатації ґрунтообробних знарядь у конкретних умовах; Volokha M. – сформульовано рекомендації для практичного використання отриманих результатів; Vorobiov O. – розроблено математичний апарат запропонованого методу граничних оцінок впливу профілю борозни на експлуатаційні енергетичні характеристики ґрунтообробних знарядь, який проілюстровано на прикладі дводискових сошників; Lazarchuk-Vorobiova Y. – акцентовано актуальність поширення запропонованого підходу на решту сільськогосподарських ґрунтообробних знарядь, реалізацію подальшого їхнього ефективного комп'ютерного моделювання з метою оптимізації.

3. Вірченко, Г. А., Голова, О. О., **Воробйов, О. М.**, Надкернична, Т. М., & Лазарчук-Воробйова, Ю. В. (2021). Структурно-параметрична модель поверхонь другого порядку. *Прикладна геометрія та інженерна графіка*, 100, 71–80. URL: <https://doi.org/10.32347/0131-579X.2021.100.71-80> (фахове видання категорії Б, спеціальність «131 Прикладна механіка»). Особистий внесок авторів: Вірченко Г. А. – запропоновано ідею створення узагальненої структурно-параметричної моделі поверхонь другого порядку; Голова О. О. – здійснено аналіз літературних джерел; Воробйов О. М. – розроблено математичний апарат узагальненої структурно-параметричної моделі поверхонь другого порядку; Надкернична Т. М. – оформлення статті; Лазарчук-Воробйова Ю. В. – виконано комп'ютерну побудову поверхонь.

4. Голова, О. О., Залевський, С. В., **Воробйов, О. М.**, & Лазарчук-Воробйова, Ю. В. (2021). Удосконалення геометричної форми незалежно керованого елемента маніпулятора. *Сучасні проблеми моделювання*, 21, 91–97. URL: <https://doi.org/10.33842/22195203/2021/21/91/97> (фахове видання категорії Б, спеціальність «113 Прикладна математика»). Особистий внесок авторів: Голова О. О. – запропоновано ідею вдосконалення елемента маніпулятора; Залевський С. В. – оформлення статті; Воробйов О. М. – удосконалено конструкційно-експлуатаційні параметри незалежно керованих елементів маніпулятора; Лазарчук-Воробйова Ю. В. – створення нової форми елемента маніпулятора.

5. Ванін, В. В., Вірченко, Г. А., Волоха, М. П., Яблонський, П. М., & Воробйов, О. М. (2022). До питання комп'ютерного геометричного моделювання ґрунтообробних знарядь засобами структурно-параметричного формоутворення. *Прикладна геометрія та інженерна графіка*, 103, 16–22. URL: <https://doi.org/10.32347/0131-579X.2022.103.16-22> (фахове видання категорії Б, спеціальність «131 Прикладна механіка»). Особистий внесок авторів: Ванін В. В. – аналіз літературних джерел, Вірченко Г. А. – ідея структурно-параметричного формоутворення ґрунтообробних знарядь; Волоха М. П. – оформлення статті; Яблонський П. М. – запропоновано методику комп'ютерного геометричного моделювання ґрунтообробних знарядь, проілюстровану на прикладі лап-полищ культиваторів; Воробйов О. М. – акцентовано доцільність поширення напрацьованої методики моделювання лап-полищ культиваторів на інші ґрунтообробні знаряддя.

6. Яблонський, П. М., Вірченко, Г. А., Волоха, М. П., Воробйов, О. М., & Лазарчук-Воробйова, Ю. В. (2022). До питання аналізу геометричних моделей сучасних ґрунтообробних знарядь. *Сучасні проблеми моделювання*, 24, 182–189. URL: <https://doi.org/10.33842/2313125X-2022-24-182-189> (фахове видання категорії Б, спеціальність «113 Прикладна математика»). Особистий внесок авторів: Яблонський П. М. – запропоновано спосіб інтегрованих класифікацій для автоматизованого формоутворення груп технічних об'єктів; Вірченко Г. А. – актуальність подальшого розвитку методології структурно-параметричного геометричного моделювання; Волоха М. П. – систематизація ґрунтообробних знарядь; Воробйов О. М. – аналіз досліджень і публікацій щодо моделювання сучасних знарядь для механічного обробітку ґрунту; Лазарчук-Воробйова Ю. В. – перспективи продуктивного автоматизованого генерування великої кількості структурно-параметричних різновидів опрацьовуваних виробів для підвищення ефективності їх комп'ютерного проектування.

7. Ванін, В. В., Вірченко, Г. А., Волоха, М. П., Яблонський, П. М., & Воробйов, О. М. (2023). Вплив геометричних параметрів стрілкової лапи на енергетичні показники комбінованого культиватора-сошника. *Прикладна*

геометрія та інженерна графіка, 104, 30–37. URL: <https://doi.org/10.32347/0131-579X.2023.104.30-37> (фахове видання категорії Б, спеціальність «131 Прикладна механіка»). Особистий внесок авторів: Ванін В. В. – актуальність досліджень впливу геометричних параметрів ґрунтообробних знарядь на їхні енергетичні показники; Вірченко Г. А. – систематизація стрілочастих лап відповідно до призначення; Волоха М. П. – аналіз літературних джерел; Яблонський П. М. – розроблено комп'ютерні геометричні моделі різних типів стрілочастих лап, виконано їхню інтеграцію з належними математичними описами енергетичних показників комбінованого культиватора-сошника; Воробйов О. М. – акцентовано актуальність наукових досліджень щодо моделювання комбінованих ґрунтообробних і посівних сільськогосподарських знарядь в умовах застосування сучасної прогресивної системи землеробства No-till, тобто без оранки, за якої внесення насіння та добрив здійснюється в мінімально необхідну для цього борозну.

8. Ванін, В. В., Вірченко, Г. А., Яблонський, П. М., Лазарчук-Воробйова, Ю. В., & **Воробйов, О. М.** (2023). Модульно-геометричний підхід в автоматизованому проєктуванні виробів машинобудування. *Прикладна геометрія та інженерна графіка*, 105, 16–22. URL: <https://doi.org/10.32347/0131-579X.2023.105.16-22> (фахове видання категорії Б, спеціальність «131 Прикладна механіка»). Особистий внесок авторів: Ванін В. В. – актуальність подальшого покращення автоматизованого проєктування виробів машинобудування; Вірченко Г. А. – використання структурно-параметричної методології як основи для напрацьованого модульно-геометричного підходу; Яблонський П. М. – запропоновано деякі аспекти модульно-геометричного підходу до формоутворення технічних об'єктів у середовищі сучасних машинобудівних CAD/CAM/CAE систем; Воробйов О. М. – розробляння геометричних модулів машинобудівних систем автоматизованого проєктування на основі методології структурно-параметричного формоутворення; Лазарчук-Воробйова Ю. В. – концепція застосування модульно-геометричного моделювання в середовищі сучасних CAD/CAM/CAE пакетів.

9. Волоха, М., Яблонський, П., Лазарчук, М., Лазарчук-Воробйова, Ю., Воробйов, О., & Грубич, М. (2023). Аналіз методів і особливостей цифровізації даних польових досліджень як бази для управління рослинництвом. *Техніко-технологічні аспекти розвитку та випробування нової техніки і технологій для сільського господарства України*, 33(47), 22–34. URL: [https://doi.org/10.31473/2305-5987-2023-2-33\(47\)-2](https://doi.org/10.31473/2305-5987-2023-2-33(47)-2) (фахове видання категорії Б, спеціальність «133 Галузеве машинобудування»). Особистий внесок авторів: Волоха М. – актуальність цифровізації в галузі сільського господарства; Яблонський П. – запропоновано проаналізувати та систематизувати наявні методи цифровізації польових досліджень як бази для управління рослинництвом; Лазарчук М. – аналіз літературних джерел, розроблено науково-методичний підхід щодо підвищення ефективності машинного навчання з автоматичного розпізнавання сільсько-господарських культур, виявлення хвороб і бур'янів, прогнозування урожайності, управління водними ресурсами і ґрунтом; Лазарчук-Воробйова Ю. – оформлення статті; Воробйов О. – обґрунтовано важливість комп'ютерних інформаційних технологій для управління рослинництвом у сільському господарстві; Грубич М. – огляд методів аналізу великих даних.

10. **Vorobiov, O.** (2024). Computer modelling of basic design and operational geometrical parameters of double disc coulters. *Вісник Сумського національного аграрного університету. Серія: механізація та автоматизація виробничих процесів*, 4(58), 12–20. URL: <https://doi.org/10.32782/msnau.2024.4.2> (фахове видання категорії Б, спеціальність «131 Прикладна механіка»).

11. **Воробйов, О. М.** (2024). Комп'ютерне варіантне геометричне моделювання дводискових сошників засобами структурно-параметричного формоутворення. *Прикладна геометрія та інженерна графіка*, 107, 34–41. URL: <https://doi.org/10.32347/0131-579X.2024.107.34-41> (фахове видання категорії Б, спеціальність «131 Прикладна механіка»).

12. **Воробйов, О. М., & Лазарчук-Воробйова, Ю. В.** (2025). Застосування структурно-параметричного підходу до геометричного моделювання гнучкого маніпулятора як складової роботизованих систем. *Прикладна геометрія та*

інженерна графіка, 108, 64–71. URL: <https://doi.org/10.32347/0131-579x.2025.108.64-71> (фахове видання категорії Б, спеціальність «131 Прикладна механіка»). Особистий внесок авторів: Воробйов О. М. – розроблено структурно-параметричну модель гнучкого маніпулятора; Лазарчук-Воробйова Ю. В. – запропоновано застосування структурно-параметричної методології формування для геометричного моделювання маніпулятора.

Патенти

13. *Ванін, В. В., Воробйов, О. М., Лазарчук-Воробйова, Ю. В., Голова, О. О., Луданов, Д. К., Залевський, С. В., & Яблонський, П. М.* (2025). Гнучкий маніпулятор з дистанційним керуванням. Патент на винахід №129477. Дата публ. 07.05.2025, бюл. №19/2025. URL: <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1855235/> Особистий внесок авторів: Ванін В. В. – пропозиція запатентувати гнучкий маніпулятор з дистанційним керуванням; Воробйов О. М. – запропоновано ідею маніпулятора, напрацьовано. концептуальну його конструкцію; Лазарчук-Воробйова Ю. В. – виконано моделювання ланцюга послідовно з'єднаних взаємодіючих рухомих елементів; Голова О. О. – пошук літературних джерел; Луданов Д. К. та Залевський С. В. – оформлення патенту; Яблонський П. М. – компонування гнучкого маніпулятора.

14. *Воробйов, О. М., Вірченко, Г. А., Волоха, М. П., Яблонський, П. М., Лазарчук-Воробйова, Ю. В., Голова, О. О., Залевський, С. В., Лазарчук, М. В., & Воробйов, О. О.* (2025). Гнучка стовба дводискового сошника з дистанційним керуванням. Патент на корисну модель № 161479. Заявка u202502010. Дата заявки 01.06.2025. Патент опубліковано 10.12.2025. Бюл. № 50/2025. 6 с. URL: <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1889969/> Особистий внесок авторів: Воробйов О. М. – ідея гнучкої стовби дводискового сошника з дистанційним керуванням, розроблення її концептуальної конструкції; Вірченко Г. А та Яблонський П. М. – компонування стовби дводискового сошника; Волоха М. П. – аналіз літературних джерел; Лазарчук-Воробйова Ю. В. – моделювання V-подібних рухомих елементів; Голова О. О., Залевський С. В. та Воробйов О. О. – оформлення патенту; Лазарчук М. В. – опрацьовано з'єднань гнучкої стовби.

Апробація матеріалів дисертації

15. Ванін, В. В., Яблонський, П. М., & **Воробйов, О. М.** (2022). До питання інтегрованого комплексного геометричного моделювання ґрунтообробних знарядь. *Збірник доповідей XI міжнародної науково-практичної конференції «Прикладна геометрія, інженерна графіка та об'єкти інтелектуальної власності»* (с. 4–7). Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського. URL: <https://jagegip.kpi.ua/issue/view/15550> Особистий внесок авторів: Ванін В. В. – опрацювання літературних джерел; Яблонський П. М. – на основі розроблених інтегрованих комплексних способів геометричного моделювання окреслено напрямки напрацювання нових методик і прийомів комп'ютерного структурно-параметричного формоутворення ґрунтообробних знарядь, удосконалення відповідного методичного, інформаційного та програмного забезпечення CAD/CAM/CAE систем; Воробйов О. М. – визначено ряд задач щодо практичного впровадження проаналізованого інтегрованого комплексного геометричного моделювання знарядь для механічного обробітку ґрунту.

16. **Воробйов, О. М.**, & Яблонський, П. М., (2022). Аналіз сучасного стану геометричного моделювання ґрунтообробних знарядь. *Тези доповідей 24 міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні проблеми геометричного моделювання»*. (с. 10). Запоріжжя: МДПУ. URL: <http://magazine.mdpu.org.ua/index.php/spm/issue/view/121/26> Особистий внесок авторів: Воробйов О. М. – на основі виконаного аналізу наявних засобів геометричного моделювання ґрунтообробних знарядь визначено деякі напрямки подальшого розвитку відповідних способів, прийомів та алгоритмів формоутворення; Яблонський П. М. – обґрунтовано можливість і доцільність поширення методології структурно-параметричного формоутворення на розв'язання типових задач проєктування сільськогосподарської техніки.

17. Вірченко, Г. А., Волоха, М. П., Яблонський, П. М., **Воробйов, О. М.**, Голова, О. О., Лазарчук-Воробйова, Ю. В. (2023). Комп'ютерне геометричне

моделювання ґрунтообробних знарядь засобами структурно-параметричного формоутворення. *Збірник тез доповідей XVII міжнародної науково-практичної конференції «Обухівські читання»* (с. 39–42). Київ: НУБіП України URL: https://nubip.edu.ua/sites/default/files/u231/obuhovski_chitannya_2023.pdf Особистий внесок авторів: Вірченко Г. А. – визначення актуальності для економіки України подальшого підвищення ефективності сільського господарства; Волоха М. П. – опрацювання літературних джерел; Яблонський П. М. – розроблено інтегровану структурно-параметричну варіантну комп'ютерну геометричну модель лапи-полиці для її комплексної оптимізації; Воробйов О. М. – запропоновано поширення наведеної методики моделювання лап-полиць культиваторів на інші знаряддя для механічного обробітку ґрунту; Голова О. О. – оформлення тез; Лазарчук-Воробйова Ю. В. – акцентовано певну схожість формоутворення розглянутих виробів і необхідність на основі цього розробляння належних нових способів, прийомів та алгоритмів комп'ютерного структурно-параметричного геометричного моделювання.

18. Ванін, В. В., Вірченко, Г. А., Волоха, М. П., Яблонський, П. М., **Воробйов, О. М.**, & Лазарчук-Воробйова, Ю. В. (2023). Удосконалення конструкції комбінованого лапового культиватора-сошника. *Збірник доповідей XII міжнародної науково-практичної конференції «Прикладна геометрія, інженерна графіка та об'єкти інтелектуальної власності»* (с. 4–7). Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського. URL: <https://jagegip.kpi.ua/article/view/281597> Особистий внесок авторів: Ванін В. В. та Лазарчук-Воробйова Ю. В. – опрацювання літератури; Вірченко Г. А. – оформлення тез; Волоха М. П. – визначення актуальності обраної теми досліджень; Яблонський П. М. – удосконалено конструкцію лапового культиватора-сошника з метою зниження тягового опору та підвищення якості сівби; Воробйов О. М. – розроблено компонувальну схему запропонованого лапового культиватора-сошника.

19. Вірченко, Г. А., Волоха, М. П., Яблонський, П. М., **Воробйов, О. М.**, Голова, О. О., & Лазарчук-Воробйова, Ю. В. (2024). Геометричне моделювання

поверхонь стрілчастих лап засобами структурно-параметричного формоутворення. *Збірник тез доповідей XVIII міжнародної науково-практичної конференції «Обухівські читання»* (с. 43–46). Київ: НУБіП України. URL: https://nubip.edu.ua/sites/default/files/u231/obuhovski_chitannya_2024_tezi_3_4.pdf
Особистий внесок авторів: Вірченко Г. А. – дефініція тематики дослідження; Волоха М. П. – аналіз літературних джерел; Яблонський П. М. – розроблено узагальнені геометричні моделі стрілчастих лап на основі поверхонь Кунса; Воробйов О. М. – визначено проміжки змінювання геометричних параметрів плоскорізальних та універсальних лап; Голова О. О. – оформлення тез; Лазарчук-Воробйова Ю. В. – перспективи подальших досліджень.

20. Яблонський, П. М., Вірченко, Г. А., Роговський, І. Л., Волоха, М. П., & **Воробйов, О. М.** (2024). Варіантні комп'ютерні геометричні моделі відвалів полицевого плуга. *Матеріали XIV міжнародної науково-практичної конференції «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем»* (Т. 1, с. 76–78). Чернігів: НУ «Чернігівська політехніка». URL: https://drive.google.com/file/d/1s2IU7CHhsXHLKxCXEVMEM_AxquSi6b0q/view
Особистий внесок авторів: Яблонський П. М. – визначено основи запропонованого комп'ютерного варіантного геометричного моделювання відвалів полицевих плугів; Вірченко Г. А. та Роговський І. Л. – дефініція наукової тематики; Волоха М. П. – опрацювання літератури; Воробйов О. М. – показано, що основою комп'ютерного геометричного моделювання в сучасних системах автоматизованого проєктування є математичний апарат NURBS.

21. Вірченко, Г. А., Волоха, М. П., Яблонський, П. М., **Воробйов, О. М.**, & Лазарчук-Воробйова, Ю. В. (2024). Комп'ютерне варіантне формоутворення стрілчастих лап. *Збірник доповідей XIII міжнародної науково-практичної конференції «Прикладна геометрія, інженерна графіка та об'єкти інтелектуальної власності»* (с. 4–7). Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського. URL: <https://jagegip.kpi.ua/article/view/309760>
Особистий внесок авторів: Вірченко Г. А. та Волоха М. П. – обрання теми наукових розвідок; Яблонський П. М. – запропоновано інтегровану методику комп'ютерного геометричного

моделювання, яка поєднує етап варіантного опрацювання робочих поверхонь і стадію автоматизованого конструювання стрілчастих лап; Воробйов О. М. та Лазарчук-Воробйова Ю. В. – виконано аналіз досліджень і публікацій стосовно комп'ютерного варіантного формоутворення стрілчастих лап.

22. Вірченко, Г. А., Волоха, М. П., Яблонський, П. М., **Воробйов, О. М., & Лазарчук-Воробйова, Ю. В.** (2025). Моделювання профілю борозни залежно від діаметра та кутів встановлення ґрунтообробного диска. *Збірник тез доповідей XIX міжнародної науково-практичної конференції «Обухівські читання»* (с. 19–23). Київ: НУБіП України. URL: https://nubip.edu.ua/sites/default/files/u231/1obuhovski_chitannya_2025_tezi.pdf Особистий внесок авторів: Вірченко Г. А. та Волоха М. П. – дефініція опрацьовуваної тематики; Яблонський П. М. – виконано моделювання профілю борозни; Воробйов О. М. – визначено перспективи досліджень стосовно уточнення отриманих результатів шляхом їхнього корегування в залежності від наявних конкретних обставин використання, зокрема, типу ґрунту, його фізико-хімічного стану, швидкості обробітку тощо; Лазарчук-Воробйова Ю. В. – оформлення тез.

23. Вірченко, Г. А., Яблонський, П. М., **Воробйов, О. М., & Лазарчук-Воробйова, Ю. В.** (2025). Гнучкий маніпулятор з дистанційним керуванням як компонент роботизованої системи знарядь для механічного обробітку ґрунту. *Збірник доповідей XIV міжнародної науково-практичної конференції «Прикладна геометрія, інженерна графіка та об'єкти інтелектуальної власності»* (с. 33–36). Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського. URL: <https://doi.org/10.20535/ngikg2025.XIV.332184> Особистий внесок авторів: Вірченко Г. А. та Яблонський П. М. – визначення актуальності роботизації в галузі сільського господарства; Воробйов О. М. – запропоновано застосування гнучкого маніпулятора з дистанційним керуванням як компонента роботизованої системи знарядь для механічного обробітку ґрунту; Лазарчук-Воробйова Ю. В. – опрацювання літератури.

24. Вірченко, Г. А., Яблонський, П. М., **Воробйов, О. М.**, & Лазарчук-Воробйова, Ю. В. (2025). Гнучкий маніпулятор з дистанційним керуванням: сучасні підходи до роботи в екстремальному середовищі. *Тези доповідей 27 міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні проблеми геометричного моделювання»* (с. 12). Запоріжжя: МДПУ. URL: <https://magazine.mdpu.org.ua/index.php/spm/issue/view/133/60> Особистий внесок авторів: Вірченко Г. А. та Яблонський П. М. – дефініція теми публікації; Воробйов О. М. та Лазарчук-Воробйова Ю. В. – запропоновано застосування розробленого гнучкого маніпулятора з дистанційним керуванням для використання в небезпечних середовищах.