

Видається з 1996 року
Засновник і видавець –
Сумський національний аграрний
університет
Реєстраційне свідоцтво
КВ № 23691-13531 Р від 21.11.2018 р.

Міністерство освіти і науки України

ВІСНИК СУМСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО АГРАРНОГО УНІВЕРСИТЕТУ

НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ

Виходить 4 рази на рік.

Серія «Механізація та автоматизація виробничих процесів»

Випуск 4 (54), 2023

ЗМІСТ

Редакційна колегія серії
Зубко В.М., доктор технічних наук, професор,
головний редактор, Сумський національний аграрний
університет (Україна)
Тарельник В.Б., доктор технічних наук, професор,
заступник головного редактора, Сумський
національний аграрний університет (Україна)
Думанчук М.Ю., кандидат технічних наук,
відповідальний секретар, Сумський національний
аграрний університет (Україна)
Антошевський Богдан, доктор технічних наук,
професор, Кельцький технологічний університет
(Польща)
Кундера Чеслав, доктор технічних наук, професор,
Кельцький технологічний університет (Польща)
Кирик Г.В., доктор технічних наук, доцент, Сумський
національний аграрний університет (Україна)
Лобода В.Б., кандидат фізико-математичних
наук, професор, Сумський національний аграрний
університет (Україна)
Коноплянченко Є.В., кандидат технічних
наук, доцент, Сумський національний аграрний
університет (Україна)
Гапонова О.П., доктор технічних наук, професор,
Сумський державний університет (Україна)
Хінек Рубік, кандидат технічних наук,
Чеський університет наук про життя (Чехія)
Девід Херак, кандидат технічних наук,
Чеський університет наук про життя (Чехія)
Шуляк М.Л., доктор технічних наук, професор,
Сумський національний аграрний університет
(Україна)
Харченко С.О., доктор технічних наук, професор,
Полтавський державний аграрний університет
(Україна)
Лебедєв А.Т., доктор технічних наук, професор,
Сумський національний аграрний університет
(Україна)
Соларьов О.О., кандидат технічних наук, Сумський
національний аграрний університет (Україна)
Роговський І.Л., доктор технічних наук, професор,
Національний університет біоресурсів
і природокористування України (Україна)
Оничко В.І., кандидат сільськогосподарських
наук, доцент, Сумський національний аграрний
університет (Україна)
Мельник А.В., доктор сільськогосподарських наук,
Сумський національний аграрний університет
(Україна)
Троценко В.І., доктор сільськогосподарських
наук, професор, Сумський національний аграрний
університет (Україна)
Перцевой Ф.В., доктор технічних наук, професор,
Сумський національний аграрний університет
(Україна)
Сабадаш С.М., кандидат технічних наук, доцент,
Сумський національний аграрний університет
(Україна)
Мазуренко І.К., доктор технічних наук, старший
науковий співробітник, академік Академії вищої
освіти України, Сумський національний аграрний
університет (Україна)
Сильчук Т.А., доктор технічних наук, професор,
Національний університет харчових технологій
(Україна)
Мельник О.Ю., кандидат технічних наук, доцент,
Сумський національний аграрний університет
(Україна)
Бо Лі, доктор філософії, професор, Хенанський
інженерно-дослідний центр переробки фруктів
і овочів та контролю безпеки якості Хенанського
науково-технічного інституту (Китай)
Паван Кумар, доктор філософії (тваринництва),
Університет ветеринарії та тваринництва
Гуру Ангада Дев (Малайзія)
Бондаренко Ю.В., кандидат технічних наук,
Національний університет харчових технологій
(Україна)
Самілик М.М., кандидат технічних наук, доцент,
Сумський національний аграрний університет
(Україна)
Назаренко Ю.В., кандидат технічних наук, Сумський
національний аграрний університет
(Україна)

Dongmei Liu, Gerasymenko Vladyslav

Research on 3D measurement technology based on machine vision.....3

Xin Du, Alforyov Oleksiy, Ivchenko Oleksandr, Dumanchuk Mykhailo

Study on the electro-spark deposition properties of SKH51 transition coating in composite
gradient coating.....8

Бабанов І.Г., Бабанова О.І., Михайлов В.М., Шевченко А.О., Прасол С.В.

Застосування інноваційної технології отримання функціональних продуктів харчування
на основі рослинної сировини.....16

Єрмаков С.В.

Розробка конструкції механізму автоматизованого відбору
і подачі живців у саджалках енергетичних культур.....22

Мельник В.І., Зеленський А.П., Зеленський О.П.

Обґрунтування вибору конфігурації відцентрового радіального вентилятора
з використанням програмних комплексів SOLIDWORKS та ANSYS CFX.....29

Несвідомін А.В., Воліна Т.М., Пилипака С.Ф., Бабка В.М., Грищенко І.Ю.

Зв'язок між параболою й еліпсом на поверхні кулі.....36

Синенко Т.П., Дзюба Я.С., Болгова Н.В., Назаренко Ю.В., Пуригін І.О., Одинцов С.М.

Визначення впливу пюре кропиви-яблука на якісні показники йогурту.....42

Тарельник Н.В., Гапонова О.П., Майфат М.М., Василенко М.Ю., Гейко Т.О.

Проблеми і перспективи вирішення питань підвищення довговічності деталей машин,
які працюють в умовах гідрабразивного зношування.....47

Ткачов В.Ю., Кожушко А.П.

Вплив розподілу ваги на вісі мінітрактора на його тягові показники
за імітаційними циклами PowerMix.....55

Хурсенко С.М.

Інженерна педагогіка у підготовці інженерів і науково-педагогічних кадрів
закладів вищої освіти.....62



Видавничий дім
«Гельветика»
2023

Науковий журнал
«Вісник Сумського національного
аграрного університету.
Серія: Механізація та автоматизація
виробничих процесів»
внесений до переліку наукових
фахових видань України
(категорія «Б») у галузі технічних наук
(131 «Прикладна механіка»,
133 «Галузеве машинобудування»,
208 «Агроінженерія»,
181 «Харчові технології»)
на підставі Наказів Міністерства
освіти і науки України No 1188
від 24.09.2020 (додаток 5)
та No 491 від 27.04.2023.

Науковий журнал «Вісник
Сумського національного аграрного
університету» індексується в
міжнародних наукометричних базах
Index Copernicus, ResearchBib

Матеріали журналу перебувають
у вільному доступі на сайті
<https://snaubulletin.com.ua/index.php/mapp>

Усі статті проходять процедуру
таємного рецензування.
До публікації в журналі
не допускаються матеріали,
якщо є досить підстав вважати,
що вони є плагіатом.
Відповідальність за точність
наведених даних і цитат
покладається на авторів.
Матеріали друкуються українською
та англійською мовами.
У разі цитування посилання на
«Вісник Сумського національного
аграрного університету» обов'язкове

Друкується згідно з рішенням
вченої ради
Сумського національного
аграрного університету
(протокол № 8 від 27.12.2023 р.)

Видавництво і друкарня –
Видавничий дім «Гельветика»
65101, Україна, м. Одеса,
вул. Інглезі, 6/1
Телефони: +38 (095) 934-48-28,
+38 (097) 723-06-08
E-mail: mailbox@helvetica.ua
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
ДК № 7623 від 22.06.2022 р.

Тираж 300 пр.
Зам. № 0224/155
© Сумський національний
аграрний університет, 2023

RESEARCH ON 3D MEASUREMENT TECHNOLOGY BASED ON MACHINE VISION

Dongmei Liu

Postgraduate student

Sumy National Agrarian University, Sumy, Ukraine

Xinyang Technician College, China

ORCID: 0000-0002-5303-0727

ldmei1122100@126.com

Gerasymenko Vladyslav

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor

Sumy National Agrarian University, Sumy, Ukraine

ORCID: 0000-0001-5875-8517

Vladzaoch@ukr.net

Measurement is an important means for humans to understand and transform the world, and it is the technological foundation for breaking through the forefront of science and solving major problems in economic and social development. The three-dimensional measurement system serves primary national needs, leads national economic development, and ensures national defense security. With the arrival of a new industrial revolution, major industrial countries worldwide have begun to accelerate the strategic deployment of intelligent manufacturing. As an essential component of the construction of smart factories and lighthouse factories, the 3D measurement system will play a vital role in deepening the implementation of the manufacturing power strategy and promoting the high-end, intelligent, and green manufacturing process. In recent years, optical 3D measurement technology represented by surface structured light has developed rapidly and has been widely applied in multiple material processing fields such as forging, casting, and sheet metal. To analyze the manufacturing accuracy of complex parts using surface structured light 3D measurement technology, it is necessary to first scan and reconstruct the overall 3D surface of the part. The reconstructed 3D point cloud data of the part surface should be roughly and precisely matched with the design model. Finally, based on this, data comparison and accuracy analysis should be carried out according to the actual detection requirements of different types of parts. In this process, the accuracy of 3D reconstruction of complex parts and the alignment accuracy between the reconstruction results and the design model directly determine the reliability and accuracy of the final part manufacturing and machining accuracy analysis. This article uses cases to illustrate the application of machine vision in 3D online measurement. The application of three-dimensional measurement technology in online quality inspection and grinding of blades can not only improve the measurement accuracy of online quality inspection of blades but also maintain the relative stability of robot grinding force and improve the grinding effect in robot grinding of aircraft engine blades. Applied to online quality inspection of train wheel hubs, three-dimensional measurement of train wheel adapters and high-speed train wheel size online inspection has been achieved.

Key words: digital twin, machine vision, 3D scanning and reconstruction, 3D point cloud registration.

DOI <https://doi.org/10.32782/msnau.2023.4.1>

Introduction

Machine Vision is a comprehensive science that is based on a series of geometric optics, classical mathematical algorithms, and integrates modern anatomy, neurophysiology, computer technology, statistics, operations research, graph theory, signal analysis and processing, and other disciplines. It is an important branch of artificial intelligence. With the rapid development of computer vision technology and optoelectronic technology, a new detection technology has emerged – computer vision detection technology (Liming Xue et al., 2023; Yajie Sun et al., 2023; Ahmad Mohamad Mezher et al., 2023; Nazanin Safavian et al., 2023; Elmira Faraji Zonouz et al., 2023). It is a detection method that uses images as a means or carrier for detecting and transmitting information when detecting the target being measured, with the aim of extracting useful signals from the image. It is a modern detection technology based on modern optics, integrating science and technology such as optoelectronics, computer imaging, information processing, and computer vision. Due to its intelligence, digitization, miniaturization, networking, and multifunctionality, as well

as its ability to perform online detection, real-time analysis, and real-time control, it has received widespread attention and application in military, industrial, commercial, medical and other fields (Elmira Faraji Zonouz et al., 2023; Kui Luo et al., 2023; Mengran Fang et al., 2023; André Luiz Buarque Vieira e Silva et al., 2023; João Peixoto et al., 2023; Obinna Nwosu et al., 2023; Wu Xiaoqiang et al., 2023; Huang Ziliang, 2023; Wei Yi, 2023; Design..., 2023; Yang Jiahe, 2023; Li Xianzheng et al., 2023; Wu Shaoji & Hu Yike, 2023; Wu Xiaoqiang & Zeng Chaoyang, 2023; Cai Yunbin, 2023).

3D measurement is one of the most important fields among the numerous applications of computer vision. In the past few decades, the rapid development of visual technology has made 3D visual inspection an important component of many automated production systems. Unlike visual pattern recognition and understanding in computer vision research, visual inspection technology is an important means of quality inspection, quantitative inspection, and non-contact measurement. Three-dimensional measurement has many applications in industrial manufacturing, which can be divided into dimension measurement, surface measurement, and

coordinate measurement according to primary functions. The current mainstream industrial 3D measurement methods include laser trackers, laser triangulation, photogrammetric systems, structured light, time-of-flight technology, and so on. 3D measurement includes the main processes of data acquisition, data processing, measurement analysis, etc.

Key Technologies of 3D Measurement System

Currently, the commonly used methods for detecting complex parts mainly include specialized fixture inspection, Coordinate Measuring Machine (CMM) measurement, and Photogrammetry. However, these methods can only see the dimensions of the limited positions of the parts. They need help to complete the three-dimensional measurement and accuracy analysis of the overall shape of the parts, making it difficult to provide complete and comprehensive data support for forming process optimization (Li Y & Gu P., 2004). To obtain three-dimensional data of the overall surface shape of parts, optical three-dimensional measurement technology represented by surface structured light three-dimensional measurement technology has developed rapidly in recent years. It has been widely used in multiple material processing fields, such as forging, casting, and sheet metal, achieving good application results (Su et al., 2009; Zhong et al, 2015; Han et al, 2018; He et al, 2018; Cheng et al., 2019).

To analyze the manufacturing accuracy of complex parts using surface structured light 3D measurement technology, it is necessary first to scan and reconstruct the overall 3D surface of the part. The part surface's reconstructed 3D point cloud data should be roughly and precisely matched with the design model. Finally, based on this, data comparison and accuracy analysis should be carried out according to the detection requirements of different types of parts. In this process, the accuracy of the 3D reconstruction of complex parts and the alignment accuracy between the reconstruction results and the design model directly determine the reliability and accuracy of the final part manufacturing and machining accuracy analysis.

3D scanning and reconstruction technology

The 3D scanning and reconstruction technology is affected by the occlusion of the tested part itself and the limitations of the measurement range. A single measurement can only obtain local 3D point cloud data on the part's surface (Zhang, 2010; Li et al., 2013; Zuo et al., 2018). To get complete 3D data of the part surface, it is necessary to constantly change the spatial pose of the measuring equipment during

the measurement process, measure the part from different perspectives, and register the local 3D data obtained from different viewpoints into a unified coordinate system (Levoy et al., 2000). To address this issue, the ATOS equipment from German company Gom (GOM Inspect..., 2019) and the HandyScan equipment from Canadian company Creaform (HandySCAN... 2019) use an external positioning-assisted approach to recover the spatial pose of the measured viewpoint. Method 1: The solution of the measurement viewpoint pose is completed by pasting marker points on the surface of the tested part and extracting and matching the features of the marker points (Ouellet & Hébert, 2008). Method 2: Fix the measuring equipment on a mechanical device (such as a robotic arm) and calculate the measuring equipment's spatial pose by obtaining the automatic device's internal positioning coordinates (Han et al., 2018). Method 3: Uses photogrammetric methods to visually track the measuring equipment from the outside (Cuypers et al., 2009) and calculate the spatial pose of the measuring equipment. These methods have the advantage of high positioning accuracy. Still, the dependence on external positioning assistance affects measurement efficiency and the flexibility of measurement equipment, limiting the application scenarios of structured light 3D measurement technology. As shown in Figure 1.

3D point cloud registration technology

Industrial part models are usually designed in Computer-Aided Design (CAD) software, so they are located in the design coordinate system. The measured part surface point cloud data obtained by scanning with structured light 3D measurement equipment is located in the measurement coordinate system. The difference between these two coordinate systems is usually significant, resulting in a significant initial position deviation between the design data model and the point cloud data when placed in the same coordinate system. Therefore, it is necessary to find a suitable rigid transformation matrix to register the point cloud data and the design data model together. This process is known as point cloud coarse registration (Gelfand et al., 2005; Aiger et al., 2008; Zhou et al., 2016; Rusu, 2009). After obtaining the overall 3D point cloud data of the tested part surface, it is necessary to coordinate/align the measured point cloud data with the design model before proceeding with subsequent key dimension fitting, overall accuracy analysis, and part quality evaluation operations.

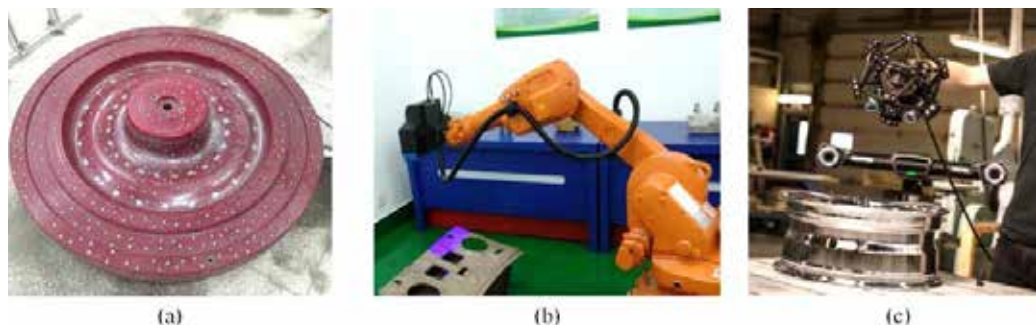


Fig. 1. External assistance based measurement equipment positioning method (a) Attaching artificial marks (b) Mechanical control positioning (c) Visual tracking positioning [31]

For traditional workpieces with simple shapes, coordinate alignment between measurement data and design models can be achieved through the 3-2-1 reference method. However, the overall shape is more complex for complex parts because they are usually composed of multiple free-form surfaces. Therefore, more accurate registration of measurement data and design models is achieved through geometric shape registration.

Because the coarse registration results of point clouds are obtained by registering a sparse set of corresponding points together, and each set of feature corresponding points cannot accurately correspond to the same spatial position, the accuracy of the coarse registration results will not be optimal. Usually, more precise geometric shape registration is required based on this, accurately aligning the measurement data with the design model. As shown in Figure 2.

Cases

Online quality inspection and grinding of blades

In article (Ghorbani et al., 2019) characterized the difference between local measurement scan data and the standard model by combining the average curvature Hausdorff distance and the average Euclidean Hausdorff distance, accurately separating unreliable damaged area scan data points of blades and improving measurement accuracy. In article (Li et al., 2016) applied three-dimensional measurement technology in robot grinding of aircraft engine blades. They introduced the weight function of stable grinding allowance into the measurement matching system, defining an optimization function based on variance minimization. At the same time, the problem of incorrect matching caused by missing points or uneven density data points in 3D scanning was solved by balancing the matching weights of all measurement points. Finally, the final measurement point cloud registration parameters were obtained through iterative optimization algorithms. This method avoids data-matching errors caused by uneven scanning data points. It considers different machining allowance requirements for the concave and convex surfaces of the blade, making the three-dimensional measurement results beneficial for maintaining the relative stability of the robot's grinding force and improving the grinding effect. As shown in Figure 3 (b).

Online quality inspection of train wheel hubs

In article (Zhong et al., 2015) studied the measurement scanning mechanism to solve the problems of surface reflectivity changes and vibration during the scanning process, improve the quality of point cloud data generation in 3D scanning, and achieve 3D measurement of train hub adapters. As shown in Figure 3 (a) (Chen Xu., 2019), designed an automated 3D measurement and detection scheme for the online detection of high-speed train wheel dimensions, using multiple LMI GOCATOR2390 line laser sensors and high-precision 2D rotary tables to form a high-speed rail wheel rotation scanning system. As shown in Figure 4.

Development trends and challenges of 3D measurement technology based on digital twins

Currently, emerging information and communication technologies such as digital twins, cloud computing, the Internet of Things, and big data are rapidly developing, providing new ideas and opportunities for the development of

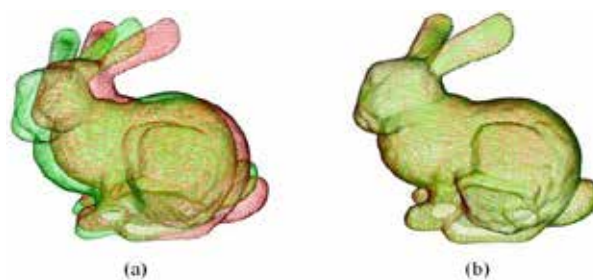


Fig. 2. Point cloud fine registration (a) initial position (b) fine registration result. The point cloud data comes from the Stanford University Graphics Laboratory (Curless B & Levoy M., 1996; Chen Xu, 2019)

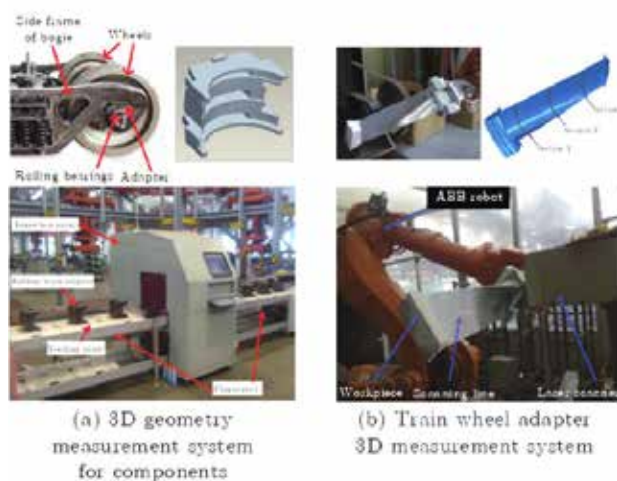


Fig. 3. 3D measurement system for complex structural components [43]



Fig. 4. High-speed rail automatic three-dimensional measurement line (Chen Xu., 2019)

high-end manufacturing. With the rapid popularization of 3D measurement equipment, point cloud processing technology is playing an increasingly important role in it. Therefore, how to achieve the integration and feedback of detection models and CAD design models is a manifestation of digital twin technology in 3D measurement technology, and it is also a technical challenge for 3D online measurement equipment. The three-dimensional measurement technology has achieved automated online quality inspection of industrial parts, which is of great practical significance for improving product quality, reducing energy consumption, and reducing labor costs.

Conclusion

With the arrival of a new round of industrial revolution and the rapid development of artificial intelligence, cloud computing, and the Internet of Things technology, major industrial countries around the world have begun to accelerate the construction of smart factories and lighthouse factories. The 3D online inspection system for parts using machine vision will be an important piece of equipment in the manufacturing and inspection of products

in intelligent factories and lighthouse factories. This article first reviews and introduces the key technologies of machine vision and 3D measurement, such as 3D scanning and reconstruction technology, 3D point cloud registration technology, etc. Finally, typical cases of the application of 3D measurement systems in the field of intelligent manufacturing were summarized, and the development trends and challenges faced by 3D measurement systems were discussed.

References:

1. Ahmad Mohamad Mezher; Andrew E. Marble; A Novel Strategy for Improving Robustness in Computer Vision Manufacturing Defect Detection, Arxiv-Cs.Cv, 2023.
2. Aiger D, Mitra N J, Cohen-Or D. 4-points congruent sets for robust pairwise surface registration. *ACM Transactions on Graphics*, 2008, 27(3): 85.
3. André Luiz Buarque Vieira e Silva; Heitor de Castro Felix; Francisco Paulo Magalhães Simões; Veronica Teichrieb; Michel Mozinho dos Santos; Hemir Santiago; Virginia Sgotti; Henrique Lott Neto; InsPLAD: A Dataset and Benchmark for Power Line Asset Inspection in UAV Images, Arxiv-Cs.Cv, 2023.
4. Cai Yunbin, Research on Key Technologies of Computer Vision Recognition and Its Application in Passenger Flow Detection Sichuan Province, Chengdu Staring Technology Co., Ltd., May 26, 2020
5. Chen Xu. Research on Complex Part 3D Reconstruction and Point Cloud Registration Technology [D]. Huazhong University of Science and Technology, 2019
6. Cheng X, Liu X, Li Z, et al. High-accuracy globally consistent surface reconstruction using fringe projection profilometry. *Sensors*, 2019, 19(3): 668.
7. Curless B, Levoy M. A volumetric method for building complex models from range images. Proceedings of the 23rd annual conference on Computer graphics and interactive techniques. *ACM*, 1996: 303–312.
8. Cuypers W, Van Gestel N, Voet A, et al. Optical measurement techniques for mobile and large-scale dimensional metrology. *Optics and Lasers in Engineering*, 2009, 47(3): 292–300.
9. Design and application of a traffic scene detection platform based on computer vision technology [J] *Western Transportation Technology*, 2023, (06): 163-165 DOI: 10.13282/j.cnki.wccst.2023.06.047
10. Elmira Faraji Zonouz; Xiao Pan; Yu-Cheng Hsu; Tony Yang; 3D Vision-based Structural Masonry Damage Detection, Arxiv-Cs.Cv, 2023.
11. Gelfand N, Mitra N J, Guibas L J, et al. Robust global registration. Proceedings of the Third Eurographics Symposium on Geometry Processing. Aire-la-Ville, Switzerland, Switzerland: Eurographics Association, 2005.
12. Ghorbani H, Khameneifar F. Accurate registration of point clouds of damaged aeroengine blades. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2021, 143(3): Article No. 031012
13. GOM Inspect is now ZEISS INSPECT Optical 3D. GOM Metrology [2019-03-07], URL: <https://www.gom.com/3d-software/gom-system-software/atos-professional.html>.
14. Han L, Cheng X, Li Z, et al. A robot-driven 3d shape measurement system for automatic quality inspection of thermal objects on a forging production line. *Sensors*, 2018, 18(12): 4368.
15. Han L, Cheng X, Li Z, et al. A robot-driven 3d shape measurement system for automatic quality inspection of thermal objects on a forging production line. *Sensors*, 2018, 18(12): 4368.
16. HandySCAN 3d – professional portable 3d laser scanner. Creaform. [2019-03-07]. <https://www.creaform3d.com/en/metrology-solutions/portable-3d-scanner-handyscan-3d>.
17. He W, Zhong K, Li Z, et al. Accurate calibration method for blade 3d shape metrology system integrated by fringe projection profilometry and conoscopic holography. *Optics and Lasers in Engineering*, 2018, 110: 253–261.
18. Huang Ziliang Research on non-destructive detection algorithm for soybean damage based on computer vision [D] University of Science and Technology of China, 2023
19. João Peixoto; João Sousa; Ricardo Carvalho; Gonçalo Santos; Ricardo Cardoso; Ana Reis; End-to-End Solution for Analog Gauge Monitoring Using Computer Vision in An IoT Platform, *Sensors* (Basel, Switzerland), 2023.
20. Kui Luo; Xuan Kong; Jie Zhang; Jiexuan Hu; Jinzhao Li; Hao Tang; Computer Vision-Based Bridge Inspection and Monitoring: A Review, *Sensors* (Basel, Switzerland), 2023.
21. Levoy M, Pulli K, Curless B, et al. The digital michelangelo project: 3d scanning of large statues. Proceedings of the 27th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques. New York, NY, USA: ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co., 2000: 131–144.
22. Li W L, Xie H, Zhang G, Yan S J, Yin Z P. 3-D shape matching of a blade surface in robotic grinding applications. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2016, 21(5): 2294–2306
23. Li Xianzheng, Zhao Zhenbin, Liu Yang, etc Commercial Homogeneity Space Measurement of Ancient Town Tourism Destinations Based on Street View Image – Taking Dali Old City as an Example [J] *Progress in Geographic Science*, 2023, 42 (01): 104-115
24. Li Y, Gu P. Free-form surface inspection techniques state of the art review. *Computer-Aided Design*, 2004, 36(13): 1395–1417.
25. Li Z, Zhong K, Li Y F, et al. Multiview phase shifting: a full-resolution and high-speed 3d measurement framework for arbitrary shape dynamic objects. *Optics Letters*, 2013, 38(9): 1389–1391.
26. Liming Xue; Junping Qin; Tong Gao; Chao Wang; Automatic Inspection and Reading System of Pointer Instrument Based on Computer Vision, International Symposium on Computer Engineering, 2023. <https://doi.org/10.1117/12.2660824>

27. Mengran Fang; Jingya Li; Li Cai; Zheng Wang; Research on Autonomous Intelligent Inspection Technology of Substation Based on Image Recognition and Computer Vision, Other Conferences, 2023.
28. Nazanin Safavian; Simon K C Toh; Martino Pani; Raymond Lee; Endoscopic Measurement of The Size of Gastrointestinal Polyps Using An Electromagnetic Tracking System and Computer Vision-based Algorithm, *International Journal Of Computer Assisted Radiology And*, 2023.
29. Obinna Nwosu; Krish Suresh; Renata Knoll; Daniel J Lee; Matthew G Crowson; A Proof-of-Concept Computer Vision Approach for Measurement of Tympanic Membrane Perforations, *The Laryngoscope*, 2024.
30. Ouellet J N, Hébert P. Precise ellipse estimation without contour point extraction. *Machine Vision and Applications*, 2008, 21(1): 59.
31. Rusu R B, Blodow N, Beetz M. Fast point feature histograms (fpfh) for 3d registration. *2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. 2009: 3212–3217.
32. Su Xianyu, Zhang Qican, Chen Wenjing Structured light 3D imaging technology *China Laser*, 2014 (02): 9–18.
33. Wei Yi Computer vision based detection of foreign objects and insulator defects in power lines [D] University of Electronic Science and Technology, 2023
34. Wu Shaoji, Hu Yike Analysis of Spatial Hyperlinks in Commercial Complex Based on Deep Learning: Taking Sanlitun Taikoo Village and Beijing APM as Examples [J] *Southern Architecture*, 2022, (01): 61-68
35. Wu Xiaoqiang, Zeng Chaoyang The impact of battlefield environmental factors on machine vision object detection [J] *Development and Innovation of Mechanical and Electrical Products*, 2021, 34 (05): 92-95
36. Wu Xiaoqiang, Zeng Chaoyang The impact of battlefield environmental factors on machine vision object detection [J] *Development and Innovation of Mechanical and Electrical Products*, 2021, 34 (05): 92-95
37. Yajie Sun; Ali Zia; Vivien Rolland; Charissa Yu; Jun Zhou; Spectral 3D Computer Vision – A Review, Arxiv-Cs. Cv, 2023. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2302.08054>
38. Yang Jiahe Data collection and analysis of hand tremors in Parkinson's patients based on computer vision [D] Harbin University of Commerce, 2023 DOI: 10.27787/dcnki.ghrbs.2023.000593
39. Zhang S. Recent progresses on real-time 3d shape measurement using digital fringe projection techniques. *Optics and Lasers in Engineering*, 2010, 48(2): 149–158.
40. Zhong K, Li Z W, Zhou X H, Li Y F, Shi Y S, Wang C J. Enhanced phase measurement profilometry for industrial 3D inspection automation. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2015, 76(9–12): 1563–1574
41. Zhong K, Li Z, Zhou X, et al. Enhanced phase measurement profilometry for industrial 3d inspection automation. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2015, 76(9): 1563–1574.
42. Zhou Q Y, Park J, Koltun V. Fast global registration. *European Conference on Computer Vision*. Springer, 2016: 766–782.
43. Zuo C, Feng S, Huang L, et al. Phase shifting algorithms for fringe projection profilometry: a review. *Optics and Lasers in Engineering*, 2018, 109: 23–59.

Люй Дунмей, аспірантка, Сумський національний аграрний університет, м. Суми, Україна, Xinyang Technician College, Китай

Герасименко В. О., кандидат фізико-математичних наук, доцент, Сумський національний аграрний університет, м. Суми, Україна

Дослідження технології 3D-вимірювання на основі машинного зору

Вимірювання є важливим засобом людства для розуміння та зміни навколишнього світу і це технологічна основа, що забезпечує розвиток передових наукових досліджень та вирішення широкого кола проблем економічного та соціального розвитку. Розвиток та вдосконалення систем 3D-вимірювання служить першочерговим національним потребам, сприяє розвитку національної економіки та є важливим елементом, що забезпечує національну безпеку. З початком нової промислової революції великі індустріальні країни світу почали прискорювати стратегічне розгортання інтелектуального виробництва. Важливим компонентом будівництва високоінтелектуальних виробничих підприємств є система 3D-вимірювання, яка має відігравати важливу роль у поглибленні реалізації стратегії виробництва та просуванні високоякісного, інтелектуального та екологічного виробничого процесу. В останні роки технологія оптичного 3D-вимірювання, представлена поверхневим структурованим світлом, швидко розвинулась і отримала застосування в багатьох областях обробки матеріалів, таких як кування, лиття та обробка листового металу. Для проведення аналізу точність виготовлення складних деталей за допомогою технології 3D-вимірювання зі структурованим світлом поверхні, на першому етапі необхідно виконати сканування та реконструювати загальну 3D-поверхню деталі. Отримані внаслідок реконструкції тривимірні дані хмари точок поверхні деталі мають бути узгоджені з проектною моделлю. На наступному етапі виконується порівняння даних та аналіз точності у відповідності до заявлених технічних вимог на контрольовану деталь. У цьому процесі точність реконструкції тривимірної поверхні складної деталі та точність кореляції між результатами реконструкції та проектною моделлю безпосередньо визначають надійність і точність остаточного виготовлення деталі та аналіз точності обробки. У цій статті розглянуто приклади, які ілюструють застосування машинного зору в 3d-вимірюваннях. Застосування технології 3d-вимірювання в системах активного контролю якості, наприклад, при шліфуванні лопатей може не тільки підвищити точність вимірювань оброблених деталей, але також дозволить забезпечити високу продуктивність та відносну стабільність сили різання при обробці лопатки турбіни авіаційного двигуна на автоматичному шліфувальному роботі. Наведено приклад застосування технології 3d-вимірювань при онлайн-інспекції якості втулок коліс поїздів, адаптерів коліс поїздів і розміру коліс високошвидкісного поїзда.

Ключові слова: цифровий двійник, машинний зір, 3D-сканування та реконструкція, реєстрація 3D хмари точок.

STUDY ON THE ELECTRO-SPARK DEPOSITION PROPERTIES OF SKH51 TRANSITION COATING IN COMPOSITE GRADIENT COATING

Xin Du

Postgraduate student
Sumy National Agrarian University, Sumy, Ukraine
Xinxiang University, China
ORCID: 0000-0002-1996-602X
51969926@qq.com

Alfyorov Oleksiy

Doctor of Technical Sciences, Professor
Sumy National Agrarian University, Sumy, Ukraine
ORCID: 0000-0002-0357-3141
oleksii.alforov@snau.edu.ua

Ivchenko Oleksandr

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
Sumy National Agrarian University, Sumy, Ukraine
ORCID: 0000-0002-4274-7693
ivchenkos@i.ua

Dumanchuk Mykhailo

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
Sumy National Agrarian University, Sumy, Ukraine
ORCID: 0000-0003-3559-4729
mykhailo.dumanchuk@snau.edu.ua

Because of the limitation of deposition thickness in electro-spark deposition (ESD) technology, composite coatings are increasingly used in electro-spark deposition. The deposition quality of transition coating is the key to improve composite coating. The deposition quality of transition coating is the key to improve composite coating. SKH51 material belongs to tungsten and molybdenum based materials and a high-speed tool steel with small and homogenous carbide particles. It has high hardness and excellent thermal hardness. It has good impact toughness and wear resistance, and can be used as the intermediate layer of carbon steel material and super-hard cermet coating. Consequently, a gradient structure is established. In this article, SKH51 material was deposited on the surface of 45 steel by the electro-spark deposition. With orthogonal experimental design, 16 sets of deposition experiments were conducted by selecting 4 factors and 4 levels. The coating thickness, coating surface roughness and maximum wear width of 16 samples were measured and counted. SKH51 coating wear surface is mainly abrasive wear and oxidation corrosion which is due to dry friction resulting in high temperatures on the surface. Because the surface of SKH51 coating was rough, the wear mass was used, the error will be larger. So the wear mark width is used to compare the wear resistance of the samples. The normalization method was used to unify the different unit coating evaluation objectives into a single metric. Three groups of weighting factors were determined using the requirements of transition coatings for coating performance indicators. Then, it was substituted into the objective function, and each experimental group normalizes the parameters for calculation. As a result, three distinct sets of maximal goal functions were obtained. The optimal value of the objective function corresponded to the 12th sample group. Finally, the deposition process parameters of the 12th sample were regarded as the optimal process for the SKH51 transition coating.

Key words: electro-spark deposition, composite gradient coating, steel, hardness, microhardness, surface layer, structure, coating, alloy, roughness, transition coating, normalization method, weighting factor method.

DOI <https://doi.org/10.32782/msnau.2023.4.2>

Introduction

Mechanical parts are subjected to impact loads during their service life. It has a certain velocity of impact in a very short period of time. In this case, the ability of the material to resist the impact load is called the toughness of the material. The coating material utilized in the ESD process exhibits brittleness and is susceptible to dislodgement upon impact. During the electro-spark deposition process, if the coating material is relatively brittle, the toughness of the

coating needs to be enhanced. The usual solutions include grain refinement, composite strengthening and toughening, and alloying. By adopting the alloying method, SKH51 was selected as the electrode material. SKH51 is a tungsten-molybdenum series high-carbon high-speed tool steel (Thammachot et al., 2023) with high hardness (61-64HRC) and high high-temperature hardness (Chuang et al., 2011). SKH51 has good toughness (Khadem et al., 2021) and wear resistance, it is mostly used in the mold industry

and in the cutting tool industry (Lawanwong et al., 2011). The steel has fine and uniform carbide particles (Shiozawa et al., 2006). The presence of molybdenum can reduce carbide segregation, and vanadium can make the steel more stable when heated. Its wear resistance is 2 times higher than high chromium high carbon steel and toughness is 1.5 times stronger. As an intermediate layer, SKH51 coating can have good compatibility (Aghajani et al., 2020) with cobalt alloys in WC-8Co, WC-10Co and WC-12Co coatings. Because ESD process is limited by the thickness and functionality of a single coating (Shafyei et al., 2020), composite coating structures are often used to make up for the shortcomings of the process (Aghajani et al., 2020). The surface properties of the intermediate coating are directly related to the coating deposition quality of the outer layer. Therefore, the improvement of the surface properties of the intermediate coating has a positive significance on the deposition quality of SKH51+WC composite gradient coatings.

Bai (Bai et al., 2021) proposed to obtain high-hardness, high-toughness wear-resistant coatings using gradient coatings by using gradient coatings, layered structural coatings, and multiple-scale structural coatings. G. Rolland (Rolland et al., 2019) used Stellite 6 electrodes of cobalt-based alloy to improve the toughness and hardness of ESD coatings. Liu (Liu et al., 2019) modified the toughness of AlCrSiN coatings with the addition of nickel material. The SKH51 material utilizes the ferrous matrix to ensure adequate toughness, and its hardened composition gives it a certain degree of wear resistance.

The fine tungsten carbide particles formed internally, which makes the SKH51 material have a certain degree of wear resistance. Metal hard compounds have high hardness and good wear resistance. Carbides and nitrides of metal elements are usually used to strengthen the surface hardness of the coating. Hossein (Aghajani et al., 2020) deposited WC/TiC/Co/Ni composite coatings on the surface of St52 steel, which increased the surface micro-hardness by 710HV. Yusuf Kayali (Kayali et al., 2021) deposited WC coatings on AISI 5140 to generate a hardness gradient structure for better wear resistance. Wang (WANG et al., 2021) used Ni and Mo as transition layers and formed a WC-Ni composite coating when the deposited coatings was made on the surface of H13 steel by ESD. Zhao Wang (Zhao et al., 2023) used the WC-10%Co coating deposition experiment on the tc11 surface and comprehensively evaluate the coating quality, and the ESD process parameters for the repair of the coating defects were determined. Mert Onan (Onan et al., 2021) uses electro-spark deposition technology to deposit double layers of WC and WC + SS (tungsten carbide and stainless steel) coatings on the surface of 45 mold steel to improve the toughness and wear resistance of the mold surface.

Materials and Methods

Material Analysis and Deposition Parameters

The ESD electrode used a rod with a diameter of 3mm (Jinxin Co., Ltd. China). The material utilized for its construction was SKH51, which originated from Japan, as shown in Table 1.

Table 1

Elemental content of SKH51 alloy steel

Element	C	W	Si	Cr	Mo	V	Fe
Content (%)	0.85	5.8	0.45	4	4.8	1.8	other

Firstly, 2mm thickness of 45 steel plate was cut into 25*30 mm size. Then, 240-400-800-1200 grit sandpaper was selected to grind the surface successively in order to remove the oxide layer and impurities. The samples were placed in a beaker soaked in 99 per cent anhydrous ethanol and cleaned with an ultrasonic cleaner. Then, a hair dryer was used to dry the surface of the samples. The ESD deposition equipment was selected as HMT9500 from Shanghai Shengzao Company, as shown in Fig. 1. SKH51 rod with a diameter of 3mm was selected as the electrode, and argon gas was used as the protective gas. The experiments were carried out by Taguchi OA Design of Factorial Design (Weiwei et al., 2007) for ESD deposition experiments on 45 steel surfaces, the process parameters are shown in Table 2. Based on the pre-experimental results, the parameters related to the 4-factor, 4-level test were determined, as shown in Table 3. The deposition time was 5 min each time.



Fig. 1. The electro-spark deposition equipment (HMT9500)

Table 2

The ESD process parameters

No	Efficiency	Voltage	Current frequency	Rotate Speed
Unit	%	V	Hz	r/min
1	20 (1)	25 (1)	100 (1)	150 (1)
2	30 (2)	35 (2)	200 (2)	225 (1)
3	40 (3)	45 (3)	300 (3)	300 (1)
4	50 (4)	55 (4)	340 (4)	375 (1)

() – Level values in brackets

Materials Testing methods

After deposition of the samples, the graphite powder was wiped from the processed surfaces with a brush. The surface was then measured for roughness experiments by a roughness tester (Mitutoyo Co., Ltd., SJ-210). The ball-disc friction and wear tester MS-T300 was used for the abrasion resistance test (Huahui Instrument Co., Ltd., MS-T300), in which the test parameters were set as follows: load 5N, test time 10 min, spindle speed 600 r/min, and test radius 3.5 mm. 5mm friction balls (ZrO₂, G10 precision) were used for the surface abrasion test. After the test, the powder on

Table 3

Taguchi OA experimental scheme for SKH51 deposition experiments

№	Efficiency	Voltage	Current Frequency	Rotate Speed
Unit	%	V	Hz	r/min
1	25	20	100	150
2	30	28	100	225
3	35	36	100	300
4	40	44	100	375
5	30	20	200	300
6	25	28	200	375
7	40	36	200	150
8	35	44	200	225
9	35	20	300	375
10	40	28	300	300
11	25	36	300	225
12	30	44	300	150
13	40	20	400	225
14	35	28	400	150
15	30	36	400	375
16	25	44	400	300

the surface of the parts was removed by brushing, and the scratches were wiped with anhydrous alcohol and dried naturally. The abrasion marks were measured by a microscope (Leica Co., Ltd., DM6).

Results and Discussion

1. Coating Thickness

The experiments were carried out to measure the thickness of the deposited surface according to the orthogonal experimental scheme in Table 3. Measurements were carried out on the surface at five specific places, and which of values were averaged in order to eliminate the measurement error. According to the orthogonal experiment Table 4 (Hazra et al., 2022), the coating thickness is able to reflect the deposition quality of the coating. The extreme value R of the orthogonal table is found to be in the measurement range of these experiments. The larger the value of the extreme value R reflects the large influence of this factor on the coating thickness. The order of factors affecting the thickness of deposition: Rotate Speed > Current Frequency > Voltage > Efficiency. The rotate speed of ESD deposition process parameter has the greatest effect on the thickness of the deposited layer; Efficiency has a lesser effect on the deposited thickness. The larger the electrode rotate speed, the larger the thickness of the deposited coating. However, due to the high speed of the electrode, the uniformity of the deposition process on the surface will become worse, and the friction of the electrode movement will increase during the experiment. In Fig. 2, sample 15 has the largest coating thickness with a value of 45.9 μm ; Samples 10, 12, 14, 15 and 16 were the alternative feasible solutions.

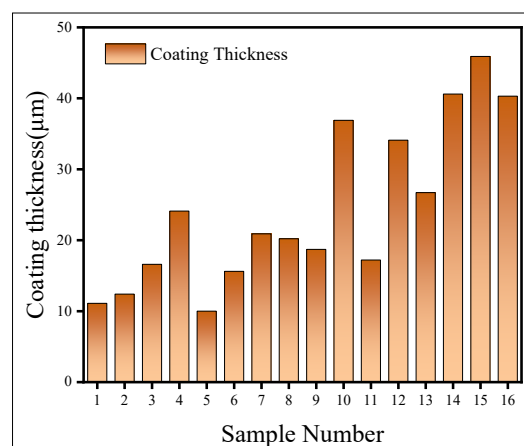
2. Coating roughness

The deposited surface was measured by Mitutoyo SJ-210 roughness meter. The roughness meter was selected from the ISO 1997 standard and the surface was measured over a length of 3mm. The objective of this study is to perform roughness measurement on the surface of SKH51 coating. Three measurements will be conducted on each sample surface, and the average value of Ra for the sample will be calculated. The results were analysed on the basis of

Table 4

Taguchi OA Experiments on Coating Thickness

№	Efficiency	Voltage	Current Frequency	Rotate Speed	Coating Thickness (μm)
1	1	1	1	1	11.1
2	2	2	1	2	12.4
3	3	3	1	3	16.6
4	4	4	1	4	24.1
5	2	1	2	3	10
6	1	2	2	4	15.6
7	4	3	2	1	20.9
8	3	4	2	2	20.2
9	3	1	3	4	18.7
10	4	2	3	3	36.9
11	1	3	3	2	17.2
12	2	4	3	1	34.1
13	4	1	4	2	26.7
14	3	2	4	1	40.6
15	2	3	4	4	45.9
16	1	4	4	3	40.3
K1j	26.725	16.675	16.05	38.375	
K2j	25.15	26.375	16.625	29.675	
K3j	24.025	25.6	21.05	27.15	
K4j	25.95	19.125	26.675	26.075	
R	2.7	9.7	10.625	12.3	

**Fig. 2. Deposition quality and coating thickness of SKH51 coating**

the orthogonal experimental scheme. The influence of ESD deposition parameters is reflected based on the extreme values of R in the orthogonal table. As shown in Table 5, the order of effect of deposition factors: Rotate Speed > Voltage > Current Frequency > Efficiency. By average roughness values, it is found that rotate speed has a significant effect on surface roughness than other process parameters. At a certain energy, too much and too little rotate speed causes an increase in surface roughness. Thus, when the three process parameters of Current Frequency, Voltage and Efficiency increase, the energy is greater; when the energy increases, the coating thickness increase, but the surface roughness value will increase. As shown in Fig.3, sample 14, 15, and 16 appeared larger roughness. There was a tendency for

surface roughness to decrease with smaller deposition thickness. However, too small a thickness was not conducive to the formation of a transition layer, even if there was a good roughness. Samples 4, 12 and 10 were feasible options.

Table 5

Taguchi OA Experiments results for mean values of coating roughness

Extreme	Efficiency	Voltage	Current Frequency	Rotate Speed
R	0.0805	0.2225	0.10375	0.319

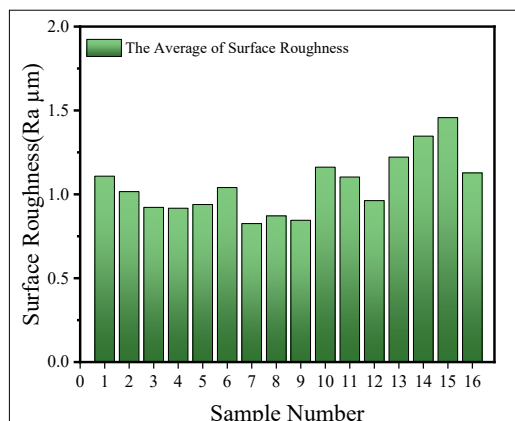
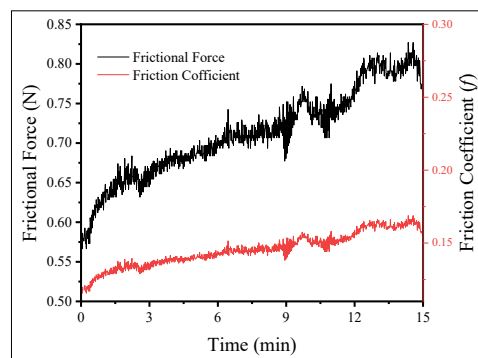


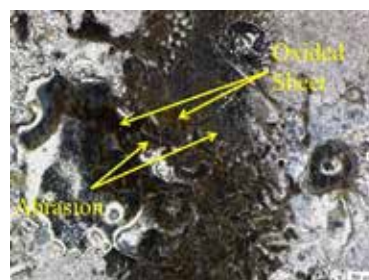
Fig. 3. Average of Surface Roughness

3. Abrasion resistance tests of SKH51 coating

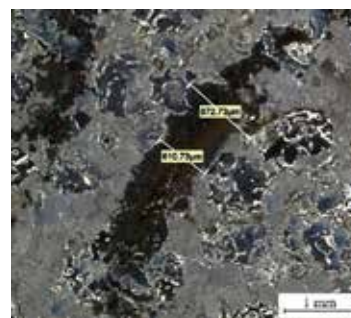
The wear resistance of SKH51 coatings were analyzed with a rotary friction and wear machine MS-T300 (Huahui Co., Ltd. China). A load of 5N was selected to carry out the wear resistance experiment on the metal surface, as shown in Fig.4a. In Fig.4b, SKH51 coating wear surface was mainly abrasive wear and oxidation corrosion which was due to dry friction resulting in high temperatures on the surface. Because the surface of SKH51 coating was rough, the wear mass was used, the error will be larger. So the wear mark width is used to compare the wear resistance of the samples. The maximum width of the wear marks was measured by super depth-of-field microscope, as shown in Fig. 4c. Owing to the influence of coating surface roughness, it makes the wear marks uneven, and its friction force and friction coefficient cannot truly reflect the degree of wear resistance. The maximum width of the abrasion marks was utilized to eliminate the effect of surface roughness and coating topography. Under 25 °C experimental environment three experiments were carried out for every specimen. The data were measured separately and subsequently averaged for analysis, as shown in Fig. 5. In Table 6, according to the orthogonal experiment of extreme value R, the order of effect of deposition factors: Current Frequency > Efficiency > Rotate Speed > Voltage. Current Frequency and Efficiency have a greater influence relative to the other parameters, which make the abrasion resistance of the coating worse. As shown in Fig. 5, sample 15 has the largest wear width and the worst abrasion resistance. Sample 15, 8, 4, 3, 7 and 10 have larger widths of abrasion marks and poorer abrasion resistance.



a)



b)



c)

Fig. 4. SKH51 coating friction and wear experimental results:

a) Friction coefficient and friction; b) Friction and wear morphology; c) Abrasion measurement

Table 6

Taguchi OA Experiments Extreme for the average of the maximum wear width of SKH51 coating

Extreme	Efficiency	Voltage	Current Frequency	Rotate Speed
R	90.4125	65.7925	111.18	76.1025

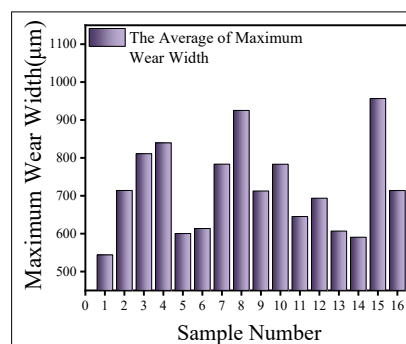


Fig. 5. Average of Maximum Wear Width of SKH51 Coatings

Model evaluation

SKH51 transition coatings can be comprehensively evaluated based on coating thickness, coating roughness and wear width. As transition coatings need serve the deposition of external coatings, they should give priority to the coating thickness and the coating roughness. A multi-objective optimal design problem (Sharafi et al., 2014) is a problem in which two or several design objectives are required to be optimal at the same time in an optimal design. If there is no unified metric for each sub-objective in objectives, it will be difficult to compare. In 1772 Franklin proposed the multi-objective problem, by now the multi-objective optimization problem has a variety of mature optimization theories and has been applied in engineering optimal design. This model uses the normalization method and the weighted factor method to transform multiple evaluation factors into a single-objective method, as shown in Formula 1.

Normalization method

Normalization method is to eliminate the effect of different units of each factor. According to the physical significance of the numerical magnitude of the factors, different functions of efficacy coefficients are selected for normalization (Landes et al., 1991; Yang et al., 2021). Coating thickness, roughness and wear width have different units, which are processed using a normalization method (Zhang et al., 2023). Higher values of average coating thickness mean better performance. It is processed according to the increasing function of the efficiency coefficient. The data were substituted into Equation 3. The smaller values of average wear width marks and average roughness mean the better performance. It is processed according to the decreasing function of the efficiency coefficient. The corresponding data were substituted into Equation 4. Eventually, the normalized data for the coating parameters were obtained as shown in Table 8.

$$f(X) = \sum_{j=1}^n a_j f_j(X) \quad (1)$$

$$\sum_{j=1}^n a_j = 1 \quad a_j \geq 0 \quad (2)$$

The evaluation factors were normalised due to the different units of the factors:

1) To denote the monotonically increasing efficacy coefficient function:

$$d_j = \begin{cases} 0 & f_j(x) \leq \alpha_j \\ (f_j(x) - \alpha_j) / (\beta_j - \alpha_j) & \alpha_j < f_j(x) < \beta_j \\ 1 & f_j(x) \geq \beta_j \end{cases} \quad (3)$$

2) To denote the monotonically decreasing efficacy coefficient function:

$$d_j = \begin{cases} 1 & f_j(x) \leq \alpha_j \\ 1 - (f_j(x) - \alpha_j) / (\beta_j - \alpha_j) & \alpha_j < f_j(x) < \beta_j \\ 0 & f_j(x) \geq \beta_j \end{cases} \quad (4)$$

Table 7

SKH51 coating performance parameters

№	Average coating thickness (µm)	Average of Surface Roughness (µm)	Average of Maximum Wear Width (µm)
1	11.1	1.108	543.67
2	12.4	1.016	713.91
3	16.6	0.922	810.84
4	24.1	0.917	839.41
5	10.0	1.533	600.24
6	15.6	1.040	613.44
7	20.9	0.825	783.42
8	20.2	0.871	925.23
9	18.7	0.845	712.45
10	36.9	1.162	783.23
11	17.2	1.103	645.15
12	34.1	0.962	693.47
13	26.7	1.222	606.75
14	40.6	1.347	590.41
15	45.9	1.457	956.54
16	40.3	1.127	713.58

Table 8

Normalized data table for coating parameters

№	Average coating thickness	Average of Surface Roughness	Average of Maximum Wear Width
1	0.03064	0.60028	1.00000
2	0.06685	0.73023	0.58767
3	0.18384	0.86299	0.35290
4	0.39276	0.87006	0.28370
5	0.00000	0.00000	0.86298
6	0.15599	0.69633	0.83101
7	0.30362	1.00000	0.41931
8	0.28412	0.93503	0.07584
9	0.24234	0.97175	0.59120
10	0.74930	0.52401	0.41977
11	0.20056	0.60734	0.75421
12	0.67131	0.80650	0.63717
13	0.46518	0.43927	0.84722
14	0.85237	0.26271	0.88679
15	1.00000	0.10734	0.00000
16	0.84401	0.57345	0.58847

Weighted factor method

A weighting factor refers to the coefficient of relative influence or weight assigned to an individual sub-objective (Kilic et al., 2006). The weighting factor method (Dragičević et al., 2018) is based on the importance and specific attributes of each variable or sub-objective. To ensure the unity of evaluation, the weighting factor method requires that the sum of the weighting factors of each factor must be 1. Transitional coatings are firstly considered to have a better surface quality of the coating to facilitate the deposition of subsequent coatings. Transitional coatings are firstly considered to have a better surface quality of the coating to facilitate the deposition of subsequent coatings. Secondly, it is considered to have a certain coating thickness. finally, it is considered that the transitional coating has a certain degree of wear

resistance than the substrate. Therefore, the weighting factors are selected taking into account the characteristics of the transition coating. The order of the selected factors is: coating roughness > coating thickness > maximum abrasion mark width. Three weighting factors were taken respectively. Therefore, according to the above factors, the weighting factors are selected from the table 9.

Table 9

Weighting factors for coating performance parameters

№	Average coating thickness	Average of Surface Roughness	Average of Maximum Wear Width
Scheme 1	0.4	0.35	0.25
Scheme 2	0.5	0.3	0.2
Scheme 3	0.6	0.25	0.15

The normalized values of the schemes in each factor were multiplied by the corresponding weighting factors, and then summed to obtain the target values for each alternative solution (Acar et al., 2009). The experimental solutions were evaluated to arrive at the optimal solution. The maximum value of the objective function was calculated by substituting the normalized data in Table 8 and the weighting factors in Table 9 into Equation 1. The results of the objective function are shown in Fig. 6.

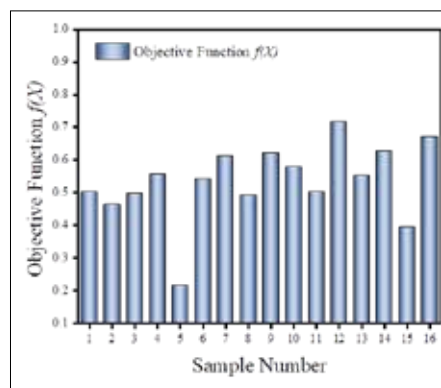
$$\text{MAX } f(X) = \sum_{j=1}^n a_j d_j \quad \left(\sum_{i=1}^n a_i = 1 \quad a_i \geq 0 \right)$$

By comparing the values of the objective functions, the three objective functions of sample 12 are all the maximum value, and the comprehensive evaluations of the transition coating are optimal in Table 9. The deposition process parameters are Current Frequency at 300 Hz; Voltage at 44 V; Efficiency at 30 %; and Rotate Speed at 150 r/min. In addition, it was suggested that sample 7 and sample 9 could be used as an alternative for the deposition of the transition layer.

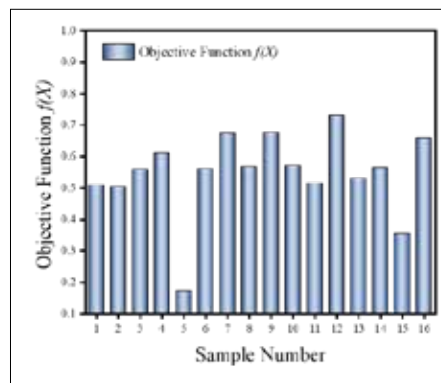
Conclusions

In SKH51+WC composite coating, the SKH51 coating that functions as an intermediate layer has a significant impact on the deposition quality of the composite coating. SKH51 coating was deposited on No. 45 steel in the experiment. With the orthogonal experimental design method, the effects of electro-spark deposition parameters on the average thickness of the coating, the average width of the maximum wear mark, and the average roughness were discussed. It was discussed respectively the effect of electro-spark deposition parameters on the average of the coating thickness, the average width of the maximum wear width, and the average roughness. It was found that each parameter had different effects on the properties of SKH51 coating. According to the normalization method and weighted factor method, the optimum deposition process of the coating was obtained from the performance requirements of the transition layer.

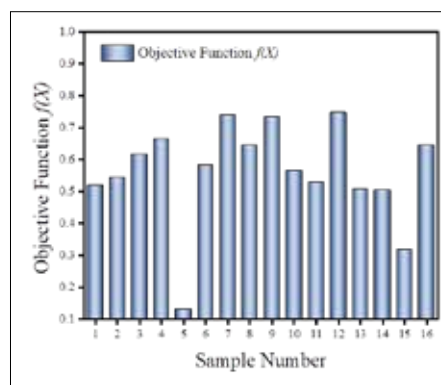
1) The influence of ESD process parameters, which were rotate speed, current frequency, voltage and efficiency was considered on the performance parameters of SKH51 coating respectively by the orthogonal experimental method. Rotate speed has a greater influence on the deposition thickness and coating roughness. Voltage has a



a)



b)



c)

Fig. 6. Objective function diagram:

- a) Weighting factor scheme 1; b) Weighting factor scheme 2;
c) Weighting factor scheme 3

greater influence on the reduction of abrasion width and the enhancement of abrasion resistance.

2) The average coating thickness, average maximum wear width, and average roughness of the SKH51 coating were analyzed from the perspective of transition coating. The normalization method and weighting factor method were used to conduct target evaluation of coating performance parameters. Three different weighting factors were selected to evaluate the SKH51 coating and draw consistent conclusions.

3) The optimal deposition process is obtained with the use of a comprehensive evaluation. The optimal deposition process parameters are Current Frequency 300Hz; Voltage 44 V; Efficiency 30 %; Rotate Speed 150 r/min.

References:

1. Acar, E., & Rais-Rohani, M. (2009). Ensemble of metamodels with optimized weight factors. *Structural Multidisciplinary Optimization*, 37, 279–294. doi:<http://doi.org/10.1007/s00158-008-0230-y/metrics>
2. Aghajani, H., Hadavand, E., Peighambaroust, N.-S., & Khameneh-asl, S. (2020). Electro spark deposition of WC–TiC–Co–Ni cermet coatings on St52 steel. *Surfaces Interfaces*, 18, 100392. doi:<https://doi.org/10.1016/j.surf.2019.100392>
3. Bai, H., Zhong, L., Kang, L. B., Liu, J., Zhuang, W., Lv, Z., & Xu, Y. (2021). A review on wear-resistant coating with high hardness and high toughness on the surface of titanium alloy. *Journal of Alloys Compounds*, 882, 160645. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.160645>
4. Chuang, M.-H., Tsai, M.-H., Wang, W.-R., Lin, S.-J., & Yeh, J.-W. J. A. M. (2011). Microstructure and wear behavior of Al_xCo₁₋₅CrFeNi₁₋₅Ti_y high-entropy alloys. 59 (16), 6308–6317. doi:<https://doi.org/10.1016/j.actamat.2011.06.041>
5. Dragičević, T., & Novak, M. (2018). Weighting factor design in model predictive control of power electronic converters: An artificial neural network approach. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 66 (11), 8870–8880. doi: <https://doi.org/10.1109/TIE.2018.2875660>.
6. Hazra, S., Mohanty, S., Kumar, S., Basak, R., & Das, A. K. (2022). Experimental investigation of powder mixed micro-electrical discharge drilling on SS304 substrate. *Materials Today: Proceedings*, 62, 270–275. doi:<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.03.258>
7. Kayali, Y., & Talaş, Ş. (2021). Investigation on wear behavior of steels coated with WC by ESD technique. *International Journal of Surface Science*, 57, 106–112. doi:<https://doi.org/10.1134/S2070205120060131>
8. Khadem, M., & Kim, D.-E. (2021). Friction and wear behaviors of bare and diamond-like carbon/chromium bi-layer coated SKH51 steel at low temperatures. *Surface Coatings Technology*, 412, 127018. doi: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2021.127018>
9. Kilic, G. B., & Cakan, M. (2006). The analysis of the impact of individual weighting factor on individual scores. *Assessment Evaluation in Higher Education*, 31 (6), 639–654. doi: <https://doi.org/10.1080/02602930600760843>
10. Landes, J., Zhou, Z., Lee, K., & Herrera, R. (1991). Normalization method for developing curves with the function. *Journal of Testing Evaluation*, 19 (4), 305–311. doi: <https://doi.org/10.1520/JTE12574J>
11. Lawanwong, K., Pornputsiri, N., & Luangsopapun, G. (2011). *An investigation of adhesion wear behavior of tool steel on blanking die*. Paper presented at the 2011 international conference on advanced materials engineering.
12. Liu, Z. R., Xu, Y. X., Peng, B., Wei, W., Chen, L., & Wang, Q. (2019). Structure and property optimization of Ni-containing AlCrSiN coatings by nano-multilayer construction. *Journal of Alloys Compounds*, 808, 151630. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.07.342>
13. Onan, M., Şahin, O., Yıldırım, E., & Talaş, Ş. (2021). Effect of WC based coatings on the wear of CK45 sheet metal forming dies. *International Journal of Surface Science Engineering Failure Analysis*, 15 (4), 265–280. doi: <https://doi.org/10.1504/IJSURFSE.2021.120959>
14. Rolland, G., Cossange, C., Andrieu, A., Blat-Yrieix, M., Sallamand, P., Duband, M., Marlaud, T. (2019). Coating toughness estimation through a Laser Shock Testing in Ni-Cr-B-Si-C Coatings. *Materials Science Forum*, 941, 1886–1891. doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.941.1886>
15. Shafeyi, H., Salehi, M., & Bahrami, A. (2020). Fabrication, microstructural characterization and mechanical properties evaluation of Ti/TiB/TiB₂ composite coatings deposited on Ti6Al4V alloy by electro-spark deposition method. *Ceramics International*, 46 (10), 15276–15284. doi: <http://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.03.068>
16. Sharafi, M., & ELMekkawy, T. Y. (2014). Multi-objective optimal design of hybrid renewable energy systems using PSO-simulation based approach. *Renewable energy*, 68, 67–79. doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.01.011>
17. Shiozawa, K., Morii, Y., Nishino, S. J. J. I. J. S. A. S. M., & Engineering, M. (2006). Subsurface crack initiation and propagation mechanism under the super-long fatigue regime for high speed tool steel (JIS SKH51) by fracture surface topographic analysis. 49 (1), 1–10. doi: <http://doi.org/10.1299/jsmea.49.1>
18. Thammachot, N., Taweejun, N., Praditja, T., & Homjabok, W. (2023). Effects of Nitrocarburization on the Surface Morphology and Tribology of SKH51 High-Speed Tool Steel. *Journal of Materials Engineering Performance*, 1–11. doi: <http://doi.org/10.1007/s11665-023-08651-5>
19. WANG, W., DU, M., ZHANG, X., & GENG, M. (2021). Microstructure and tribological properties of WC-Ni matrix cermet coatings prepared by electrosark deposition on H13 steel substrate. *Acta Metall Sin*, 57 (8), 1048–1056. doi: <https://doi.org/10.11900/0412.1961.2020.00360>
20. Yang, W.-C., Chon, S.-H., Choe, C.-M., & Yang, J.-Y. (2021). Materials selection method using TOPSIS with some popular normalization methods. *Engineering Research Express*, 3 (1), 015020. doi: <https://doi.org/10.1088/2631-8695/abd5a7>
21. Zhang, Z., Tarellyk, V., Konoplianchenko, I., Liu, G., Wang, H., Du, X., . . . Li, Z. (2023). New evaluation method for the characterization of coatings by electroerosive alloying. *Materials Research Express*. doi:<http://doi.org/DOI10.1088/2053-1591/acc15b>
22. Zhao, W., Su, H., He, W., Wang, X., Cui, X., & Luo, S. (2023). Defect Control of Electro-spark Deposition WC–Co Coatings via Adjusting Pulse Energy and Deposited Layer Number. *Journal of Materials Engineering Performance*, 32 (3), 1402–1411. doi: <https://doi.org/10.1007/s11665-022-07204-6>

Ду Сінь, аспірант, Сумський національний аграрний університет, м. Суми, Україна; Хенаньський університет, Хенань, Китайська Народна Республіка

Алфьоров О. І., доктор технічних наук, професор, Сумський національний аграрний університет, м. Суми, Україна

Івченко О. В., кандидат технічних наук, доцент, Сумський національний аграрний університет, м. Суми, Україна

Думанчук М. Ю., кандидат технічних наук, доцент, Сумський національний аграрний університет, м. Суми, Україна

Дослідження властивостей перехідного шару зі сталі SKH51, сформованому електроіскровим легуванням в композитному градієнтному покритті

В зв'язку з технологічними обмеженнями максимальної товщини наплавленого методом електроіскрового легування шару все частіше застосовуються багатошарові композитні покриття. Важливу роль в забезпеченні експлуатаційних параметрів композитного покриття відіграє якість перехідного шару. В статті досліджуються властивості перехідного шару зі сталі SKH51, яка є швидкоріжучою інструментальною сталлю, легованою вольфрамом і молібденом та містить в своїй структурі до матеріалів на основі вольфраму та молібдену і є високошвидкісною інструментальною сталлю з дрібними та однорідними частинками карбіду. Перевагами цієї сталі є: висока твердість, хороша ударна в'язкість і зносостійкість, може використовуватися як проміжний шар між вуглецевою сталлю та надтвердим металокерамічним покриттям. При цьому, в композитному покритті формується градієнтна структура. У даній статті дослідження особливостей формування проміжного шару з сталі SKH51, що нанесений на поверхню сталі 45 методом електроіскрового легування. Було проведено серію з 16 експериментів, в яких було встановлено 4 рівні значень для чотирьох параметрів процесу електроіскрового легування. Контролювалися наступні параметри: товщина покриття, шорсткість поверхні та максимальна ширина зносу 16 зразків. Встановлено, що при зношуванні поверхні покриття SKH51 відбувається переважно абразивне зношування та окислювальна корозія, які виникають в умовах внаслідок сухого тертя призводить до високих температур на поверхні. Для порівняння зносостійкості зразків використовується ширина сліду зносу, що дозволило зменшити похибку вимірювання в порівнянні з ваговим зносом в наслідок пористості отриманого покриття. Метод нормалізації було використано для об'єднання різних цілей оцінки одиничних покриттів в єдину метрику. Було визначено три групи вагових коефіцієнтів з використанням вимог перехідних покриттів до показників ефективності покриття. Отримані значення було підставлено в цільову функцію, і для кожної експериментальної групи визначено нормалізовані розрахункові параметри. В результаті було отримано три різні набори максимальних значень цільових функцій. Оптимальне значення цільової функції відповідало 12-й групі зразків. Таким чином, параметри процесу електроіскрового легування 12-го зразка приймаємо як оптимальні для процесу формування перехідного покриття зі сталі SKH51.

Ключові слова: електроіскрове легування, сталь, композитне градієнтне покриття, твердість, мікротвердість, поверхневий шар, структура, покриття, сплав, перехідний шар, шорсткість, метод нормалізації, метод вагових коефіцієнтів.

ЗАСТОСУВАННЯ ІННОВАЦІЙНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ОТРИМАННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ ПРОДУКТІВ ХАРЧУВАННЯ НА ОСНОВІ РОСЛИННОЇ СИРОВИНИ

Бабанов Ігор Геннадійович

кандидат технічних наук, доцент
Національний університет харчових технологій, м. Київ, Україна
ORCID: 0000-0001-6906-158X
igbabanov@ukr.net

Бабанова Олена Ігорівна

старший викладач
Національний університет харчових технологій, м. Київ, Україна
ORCID: 0000-0002-7114-236X
petrikeyl@ukr.net

Михайлов Валерій Михайлович

доктор технічних наук, професор
Державний біотехнологічний університет, м. Харків, Україна
ORCID: 0000-0003-4335-1751
vami2209@gmail.com

Шевченко Андрій Олександрович

кандидат технічних наук, доцент
Державний біотехнологічний університет, м. Харків, Україна
ORCID: 0000-0002-0506-472X
andshew@ukr.net

Прасол Світлана Володимирівна

кандидат технічних наук, доцент
Державний біотехнологічний університет, м. Харків, Україна
ORCID: 0000-0002-7616-770X
process229@ukr.net

Актуальною проблемою харчової промисловості є заміна білкових ізолятів, отриманих із генетично модифікованих джерел сировини. Ведуться активні пошуки нових джерел рослинного білка з генетично немодифікованих культур.

У статті розглянуто питання виробництва функціональних харчових продуктів на основі рослинної сировини, тобто виробництва харчових продуктів принципово по-новому. Систематизація та узагальнення розробок з техніки та технології одержання білкових ізолятів із рослинної сировини, а також аналіз перспектив розвитку технологічних рішень, створення ресурсозберігаючих технологій та екологічно чистого виробництва функціональних продуктів харчування.

Отримані на даний момент результати наукових досліджень надають переконливі докази існування можливості виробництва їжі за допомогою принципово нових методів. Термін «функціональні продукти харчування» надає означення продуктам, які виготовлені з використанням білків та інших поживних речовин природного походження, але їх склад, структура, зовнішній вигляд і набір властивостей сформовані штучно.

На сьогоднішній день, особливий інтерес викликають функціональні продукти харчування, які відрізняються високою біологічною цінністю та вишуканим смаком. Ці продукти вирізняються не лише своєю корисністю для здоров'я, а й сприяють задоволенню гастрономічних переваг споживачів. Вони відкривають шлях до нових можливостей у сфері харчування, дозволяючи людям отримувати не лише необхідні поживні речовини, але і насолоджуватися їжею з новими, неочікуваними характеристиками.

Роботи в цьому напрямі, спрямовані на отримання функціональних продуктів харчування, мають подвійну мету. По-перше, вони створюють продукти, які імітують традиційні вироби з фаршу. Ця технологія є порівняно простою, а отримані продукти відносно дешеві та зручні у використанні. По-друге, роботи у цьому напрямку спрямовані на створення продуктів з неподібною волокнистою структурою, особливо у м'ясних виробах, що є однією з найцінніших форм харчування. Такий підхід відкриває шлях до нових можливостей для людей, які прагнуть зберігати здоровий спосіб життя або вибирають вегетаріанський спосіб харчування. Функціональні продукти харчування, що відтворюють текстуру традиційних продуктів і одночасно збагачені корисними складовими, можуть стати важливим елементом у збалансованому харчуванні, допомагаючи задовольняти поживні потреби без необхідності використання продуктів тваринного походження.

Розроблення техніки і технології функціонального харчування дозволяє: знизити собівартість і збільшити виробництво продуктів харчування в існуючій економічній базі харчової промисловості за рахунок зменшення

втрат і використання непродовольчої сировини; досягти необхідного рівня продовольчої безпеки та вирішити проблему дитячого та лікувального харчування, харчування в незвичних умовах.

Ключові слова: білки, функціональні харчові продукти, клітковина, мокре прядіння, аналог, розріджувачі.

DOI <https://doi.org/10.32782/msnau.2023.4.3>

Постановка проблеми. Технічний прогрес у харчовій промисловості пов'язаний із досягненнями науки, особливо науки про харчування. Одним із важливих факторів розвитку є погіршення екологічних умов та висока конкуренція на продовольчому ринку. Все це призводить не тільки до вдосконалення технології отримання традиційних продуктів, але й до створення продуктів нового покоління: низькокалорійних, корисних для здоров'я, зі збалансованим складом та функціональними властивостями, можливістю швидкого приготування та тривалого зберігання (Isabella et al., 2023, 17 p.; Markina & Bol'shakova, 2019, pp. 119–128).

До харчових функціональних інгредієнтів відносяться речовини тваринного, рослинного, мікробіологічного або мінерального походження, а також природні або синтезовані харчові добавки, які використовуються під час підготовки або виробництва. Сьогодні велика увага приділяється впровадженню у виробництво продуктів харчування на основі рослинної сировини, які дозволяють збільшити обсяг, розширити асортимент та підвищити якість продукції, що випускається. В умовах кризи, коли особливо важливо зберегти досягнутий останніми роками рівень споживання продуктів харчування, роль харчових функціональних інгредієнтів зростає, з їх допомогою можна досягти більш глибокого перероблення та дбайливого використання сировини, удосконалити технологічний процес, знизити витрати виробництва, оптимізувати вартість продукції (McClements & Grossmann, 2021; Samoichuk, 2020; Savenko, & Sedikova, 2021, pp. 323–325).

У світі постійно зростає потреба у білках і продуктах на їх основі, але за даними ВООЗ, понад 60 % людства не отримують достатньої кількості білка. Нестача білків у харчуванні порушує динамічну рівновагу метаболічних процесів за їх участю, зрушуючи її в бік переважання розпаду власних білків клітин організму, що призводить до його виснаження. У зв'язку з цим особливої значущості набувають питання забезпечення населення білковими компонентами харчування, також підвищується пріоритет досліджень у цьому напрямі, що підтверджується розробкою та запровадженням спеціальних програм у промислово-розвинених країнах світу. Одним зі способів поліпшення харчової цінності продуктів є використання нових джерел сировини (Hiroyuki & Wei, 2022; Röhling et al., 2021).

Науковою основою сучасної стратегії виробництва є пошук нових ресурсів незамінних компонентів їжі, використання нетрадиційних видів сировини, створення нових прогресивних технологій, що дозволяють підвищити харчову і біологічну цінність продукту, надати йому задані функціональні властивості, збільшити термін зберігання. У світовій практиці одним із поширених способів коригування складу продуктів стало комбінування сировини з компонентами рослинного та тваринного походження. Особливий інтерес у цьому відношенні представляють зернові, зернобобові культури та молочні білки.

За допомогою білка задовольняється потреба організму в загальному азоті, що забезпечує біосинтез замінних амінокислот та інших азотовмісних ендогенних біологічно активних речовин. Якість харчового білка характеризується перш за все його біологічною цінністю, ступенем чистої утилізації, амінокислотним складом, коефіцієнтом перетравлюваності білка їжі людиною. Найбільш близькими до «ідеальних» є білки яєць, м'яса, молока.

Пряме використання рослинних білків, таких як соя, є більш ефективним, ніж отримання білка від тварин, яких годували рослинними білками. Це дуже важливо для країн із обмеженими економічними ресурсами. Амінокислотний профіль соєвого білка вважається найбільш близьким до тваринних білків. Соя містить значну кількість повноцінного білка та деяких незамінних амінокислот.

Наразі актуальною проблемою харчової промисловості є заміна білкових ізолятів, отриманих із генетично модифікованої сировини. Тривають активні пошуки нових джерел рослинного білка з генетично не модифікованих культур.

Мета досліджень: систематизація та узагальнення розробок із техніки й технології отримання білкових ізолятів із рослинної сировини, аналіз перспектив розвитку технологічних рішень щодо створення інноваційних технологій та екологічно чистих виробництв отримання функціональних продуктів харчування на основі рослинної сировини.

Матеріали і методи. Об'єктивними причинами застосування інноваційної технології отримання функціональних білкових продуктів є: зростання чисельності населення; необхідність випуску харчових продуктів із складом, що відповідає сучасному способу життя.

До потенційних сировинних джерел відносяться: зернобобові, хлібні і круп'яні культури, олійні, вегетативна маса рослин, продукти перероблення фруктів і ягід, горіхи. Традиційною для виробництва білкових продуктів є соя.

Характерною особливістю інноваційної технології є застосування комплексного перероблення продовольчої сировини, що дозволяє використовувати значні потенційні ресурси білку.

Основними завданнями інноваційної технології виробництва харчового білку є: вилучення його з сировини з мінімальними втратами; мінімальні зміни функціональних властивостей білку з збереженням біологічної та харчової цінності.

Харчові білки виготовляють у вигляді трьох основних типів продуктів (крупка й борошно, ізоляти та концентрати), які відрізняються за вмістом білку. Усі три основні типи харчових білків або білкових продуктів виготовляються у вигляді широкого спектру модифікацій, які розрізняються за своїми функціональними властивостями. Широке застосування в харчовій промисловості отримали білкові продукти з соєвих бобів (знежирене соєве борошно, соєві концентрати, соєві молочні й м'ясні продукти), що мають високі функціональні властивості.

Результати досліджень. Наразі одним із основних напрямів використання рослинного білка вважається

його застосування для вітчизняного м'ясного ринку. Рослинний білок дозволяє здійснити рівноцінну заміну натуральній м'ясній сировині, поліпшити якісні характеристики готової продукції, знизити собівартість продуктів харчування, збагатити м'ясні продукти необхідними для людини харчовими нутрієнтами (харчові волокна, вітаміни та ін.) (Kopytec' & Voloshyn, 2020).

Дослідження, що проводяться в багатьох країнах світу, зі збагачення харчових продуктів функціональними речовинами з метою поліпшення їх якості передбачають збалансованість амінокислотного складу білків й жирнокислотного складу ліпідів. Проте всі ці роботи включають, як правило, використання сировини тваринного походження – м'яса, м'ясопродуктів, казеїну, сироваткових білків. При цьому стає завдання створити функціональні білково-ліпідні напівпродукти, збалансовані за основними поживними компонентами, які зручно зберігати та легко переробляти у харчові продукти.

Реалізація зазначених вище вимог не може базуватися лише на відомих технологічних рішеннях, тому необхідний пошук нових теоретичних і практичних підходів, спрямованих на розробку композитів поліфункціонального призначення для застосування їх з метою розширення вітчизняного сировинного ринку та асортименту біологічно цінних харчових продуктів.

Головним недоліком відомих способів вилучення білкових ізолятів (за винятком турбосепарації) є необхідність застосування агресивних речовин, для елімінації яких потрібне багаторазове промивання водою. Це спричиняє екологічні проблеми і призводить до здорожчання одержуваного ізоляту (Klyumenko et al., 2006).

Аналіз результатів досліджень показує, що білки комплексної суміші мають високі значення жироемульгуючої, водо- і жиротримуючої здібностей, завдяки чому рослинні композити можна використовувати у виробництві різних паст та емульсій. Проведені дослідження показали доцільність використання рослинних композитів у складі різноманітних харчових продуктів з метою регулювання їх функціональних властивостей, тобто підвищення або зміни властивостей білка для забезпечення стабільності технологічного процесу та якості одержуваних продуктів, а також для розширення методів, що застосовуються для переробки, та асортименту одержуваних продуктів.

Отримані результати досліджень доводять можливість виробництва харчових продуктів з різноманітними функціональними властивостями (Motuzka & Koshelnuk, 2019).

Залежно від способу застосування функціональні харчові продукти поділяють на дві категорії: розріджувачі й аналоги.

Термін «розріджувачі» означає, що ці продукти використовують у комбінації з натуральними. До розріджувачів належать білки сої, які після спеціального оброблення для надання потрібних функціональних властивостей змішують із м'ясним фаршем і переробляють у різноманітні вироби. Більш широке застосування отримали розріджувачі на основі текстурованих білків, оскільки вони мають суттєво кращі функціональні властивості (високий ступінь набухання, вологопоглинальну

та жирозв'язувальну здатність, потрібну консистенцію та макроструктуру, характерну для м'ясопродуктів).

Термін «аналоги» означає, що ці м'ясопродукти імітують за зовнішнім виглядом, консистенцією, кольором, смаком і запахом традиційні м'ясні та рибні вироби.

До функціональних м'ясопродуктів, що імітують вироби із січеного м'яса (ФМС) належать ковбасо-сосисочні вироби, шніцелі, котлети, м'ясний хліб, холодні м'ясні сніданки, паштети тощо. Їх виробляють головним чином на основі білків сої та пшениці, яєчного альбуміну, казеїну або їх сумішей. Зазвичай вони являють собою драглі, наповнені дисперсіями білків, поліцукридів (кромхаль) і ліпідів (олії та тваринні жири).

Для отримання ФМС у розчин або дисперсію білкового чи поліцукридного драглеутворювача вносять тонкоподрібнені харчові, смакові, ароматичні речовини і барвники. Отриману дисперсію з рідкою безперервною фазою дозують у відповідну оболонку або форму і переводять в драглеподібний стан. У результаті отримують ізотропні драглі, наповнені харчовими речовинами які імітують вироби із січеного м'яса.

Для виробництва функціональних м'ясопродуктів волокнистої структури (ФМВ) зазвичай використовують білкові волокна, які отримують методом «мокрого» прядіння розчинів білків.

Харчові волокна широко використовуються в виробництві продуктів харчування в якості домішок, що змінюють структуру та хімічні властивості харчових продуктів. До того ж перевагою застосування харчових волокон є здатність позитивно впливати на організм людини. Використання харчових волокон в м'ясопереробній промисловості дозволяє збільшити вихід готового продукту і знизити його собівартість.

За технологією волокна склеюють харчовим сполучником, що містить різні харчові речовини і барвники. Змінюючи фізичні параметри волокон і сполучника, їх співвідношення і характер укладання волокон, вдається досить повно відтворювати волокнисту структуру, органічні й споживчі характеристики великої кількості традиційних м'ясопродуктів. За цією технологією отримують широкий асортимент аналогів м'яса тварин, риби і птиці.

Відомі два основних види ФМВ, що відрізняються складом і способами отримання. Перший являє собою харчові драглі (сполучники), наповнені істинними волокнами білків або поліцукридів. У другому випадку ФМВ – це система харчових волокон, скріплених сполучником. У першому випадку основна кількість харчових, смакових і ароматичних речовин міститься в драглях, армованих волокнами. Вимоги до механічних і фізико-хімічних властивостей драглів досить високі. Волокна можуть мати знижену біологічну цінність (волокна на основі ізоляту соєвого білка) або взагалі не перетравлюватися в шлунково-кишковому тракті (волокна на основі кислих поліцукридів або целюлози). Вони надають продукту неоднорідної (за органолептичним оцінюванням) м'ясоподібної консистенції і волокнистої структури.

У другому випадку використовують переважно білкові волокна, з'єднані малою кількістю зв'язуючого розчину або заливними композиціями. Зв'язуючими компонентами

зазвичай слугують рідкі композиції або дисперсії, що утворюють драгли під час нагрівання. Заливними композиціями можуть бути розтоплені харчові жири, розчини желатину й інші рідкі системи, що переходять у твердий стан після охолодження. У цих продуктах вищі ступінь орієнтації та щільність укладання волокон, але суттєво нижчі вимоги до міцнісних властивостей сполучника. Тому руйнування і подрібнення ФМВ під час пережовування їжі супроводжуються розділенням волокон та імітують неоднорідну м'ясоподібну консистенцію.

У всіх випадках «мокрого» прядіння білкових волокон перша стадія процесу полягає у приготуванні прядильного розчину білка. Зазвичай переробляють глобулярні білки, макромолекули яких порівняно слабо взаємодіють у розчинах. Для того щоб викликати помірну денатурацію білків і підвищити міжмолекулярну взаємодію, їх зазвичай розводять у розчинах лугів, сечовини або поверхнево-активних речовин. Як відомо, здатність утворювати стабільні рідкі нитки пов'язана з наявністю в розчині асиметричних, сильно взаємодіючих частинок і значною мірою залежить від його реологічних і поверхневих властивостей. Для отримання властивостей пасмовості прядильні розчини білків мають дозріти. Потім їх протискають крізь фільтр у коагуляційну ванну. Формують волокна в кислотно-сольових коагуляційних ваннах, де тонкі струмені прядильного розчину переводять із рідкого в драглеподібний стан. Після коагуляційної ванни для зміцнення і підвищення водостійкості

тонкі нитки піддають однобічному розтягуванню (орієнтаційне витягування на 50 – 400 %). Цю операцію зазвичай виконують із нагріванням у гарячій воді або на пару. Орієнтаційне витягування є важливим елементом процесу. Воно приводить до зміцнення волокон і часткової втрати ними води в результаті вимушеного синерезису. Не піддані витягуванню волокна є крихкими, недосить міцними й легко зминаються. Потім волокна змішують зі сполучником, що містить харчові, смакові, ароматичні речовини і барвники, після цього пропускають через ванну з нагрітим жиром.

Надалі були вдосконалені вищенаведена технологія отримання ФМВ і стадія отримання прядильного розчину. Дозрівання прядильного розчину білка в лузі при рН 12–13 триває до 24 годин, тому цей розчин набуває специфічного неприємного запаху. Це явище може бути частково або повністю усунене додаванням до граничного розчину сульфату. У результаті цього покращуються смакові властивості, запах і консистенція штучних м'ясопродуктів.

Установлено, що зменшення тривалості дозрівання прядильного розчину досягається точним дозуванням луку, підтриманням температури і концентрації білка в певному інтервалі (Savchuk, 2017, pp. 64–71).

На рис. 1 наведено технологію й апаратурно-технологічну схему для безперервного оброблення білкових волокон у коагуляційній, промивній і нейтралізаційній ваннах безперервного просочування волокон сполучником, орієнтування пучків волокон і затвердіння сполучника.

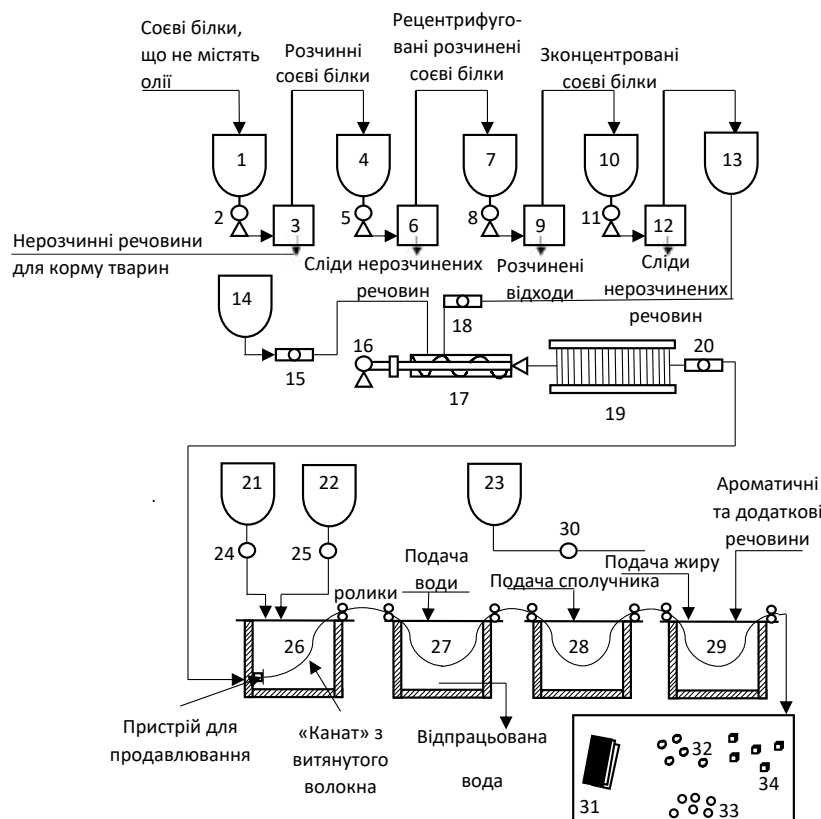


Рис. 1. Схема технологічної лінії з виробництва білкових ниток із сої та виготовлення з них аналогів м'яса:

1, 4, 7, 10, 13, 14, 21, 22, 23, 26, 27, 28, 29 – ванна підігрівання, витримування, підкислення, повторного розрідження, білкового тіста, луку, сольова, з кислотною водою, жирового постачання, коагуляції, промивання, зв'язування та жирового покриття, відповідно; 2, 5, 8 та 11 – насоси; 3, 6, 9, 12 – центрифуги; 15, 18, 20 – дозувальні насоси; 16 – двигун; 17 – насос гвинтового типу; 19 – фільтр; 24, 25, 30 – вимірювальні прилади; 31 – скибки; 32 – шматки; 33 – гранули; 34 – кубики

Автоматизований і механізований процес перероблення є повністю безперервним включаючи подачу сировини зі складу. Процес починається з водної екстракції лужного розчину білка з борошна соєвих бобів. Нерозчинні речовини видаляються центрифугуванням. Потім у результаті оброблення екстракту сірчистим газом знижується рН екстракту, що дозволяє виділити білок у вигляді осаду. Отримане в результаті «молоко, що зіслося» піддається центрифугуванню для згущення білка.

Небажані домішки, «сліди» розчинних речовин, видаляються внаслідок повторного переведення концентрату в стан рідкої суспензії з подальшим повторним центрифугуванням. Знову отриманий згущений білок-екстракт переводиться потім у стан суспензії або пасти шляхом уведення лужного розчину.

Далі паста стабілізується до рН, що дорівнює приблизно 12, фільтрується і пропускається через пристрій для продавлювання ниток. Потім білок проходить через підкислену солону ванну, призначену для коагуляції. Сіль запобігає повторному розчиненню білка. Серія відвідних роликів, що обертаються зі зростаючою швидкістю, забезпечує розтягування кожної нитки волокна і втягування її через другу ванну термічного оброблення. Ступінь жорсткості або м'якості продукту регулюється натягом, прикладеним до волокна на початкових етапах формування. Нарешті нитки піддаються промиванню і проходять через ролик, що вижимають надлишкову воду.

Подальше оброблення промитих ниток визначається типом виробленого продукту. Просочені нитки розрізають, висушують і покривають олією. Широко застосовується для приготування штучних м'ясних продуктів також бавовняне насіння, що, як і соєві боби, є сировиною для приготування борошна з концентратів і екстрактів.

Висновки. Функціональні харчові продукти – це продукти, багаті на повноцінний білок, одержувані на основі

натуральних харчових речовин шляхом приготування суміші розчинів або дисперсій цих речовин з харчовими студнеутворювачами та надання їм певної структури та форми конкретних харчових продуктів. В основному для виробництва функціональних харчових продуктів використовуються білки з двох основних джерел: білки, що виділяються з нетрадиційної натуральної харчової сировини (рослинної та тваринної), запаси якої у світі досить значні; білки, що синтезуються мікроорганізмами, зокрема різними видами дріжджів.

Функціональні харчові продукти отримують у вигляді гелів, волокон, суспензій й емульсій. Для надання смаку, запаху, кольору додають харчові барвники, смакові та ароматичні речовини. Готовий продукт повинен відповідати заданим органолептичним властивостям та мати біологічну цінність й притаманні натуральному продукту технологічні властивості (придатність до термічного оброблення, можливість довготривалого зберігання та транспортування).

Рациональне використання сировинних ресурсів, зокрема м'ясної та молочної сировини, нерозривно пов'язане з використанням білково-жирових емульсій, білкових збагачувачів рослинного походження, інших рослинних добавок, модифікацій існуючих технологій. Це дає не тільки економію тваринної сировини, а й дозволяє отримати функціональні харчові продукти з цільовими дієтичними та профілактичними властивостями. Одним із основних напрямків коригування складу молочних та м'ясних продуктів є комбінування їх із сировиною рослинного походження, зокрема із зерновими культурами. Введення до їх складу різних добавок та біологічно активних компонентів у вигляді паст, емульсій сприяє підвищенню якості, покращенню смакових характеристик, а також розширенню асортименту з урахуванням національних особливостей населення країни.

Бібліографічні посилання:

1. Artificial foods. Encyclopedia.com. Vylucheno iz URL: <https://www.encyclopedia.com/food/encyclopedias-almanacs-transcripts-and-maps/artificial-foods>.
2. Artificial food and dairy substitutes – Comfort food from the science lab. Online magazine for professional chefs. Vylucheno iz URL: <https://www.ktchnrebel.com/artificial-food>.
3. Artificial Food Products. The Need for Legal Regulation SpringerLink. Vylucheno iz URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-39797-5_54.
4. Artificial Food. Desflora – Artificial Flowers. Vylucheno iz URL: <https://desflora.com.au/product-category/artificial-food>.
5. Can Artificial Food Put an End to Famine? The Medical Futurist. Vylucheno iz URL: <https://medicalfuturist.com/can-artificial-food-put-an-end-to-famine>.
6. Food made from, quite literally, thin air. Big Agency News. Vylucheno iz URL: <https://co-nxt.com/blog/the-rise-of-cellular-agriculture-synthetic-meat-and-lab-coat-farming>.
7. Henchion, M., Moloney, A. P., Hyland, J., Zimmermann, J. & McCarthy, S. (2021) Review Trends for meat, milk and egg consumption for the next decades and the role played by livestock systems in the global production of proteins. *Animal*, 15, 100287.
8. Hiroyuki, Yano & Wei, Fu (2022) Effective Use of Plant Proteins for the Development of “New” Foods. *FOODS*, 11 (9), 1185. <https://doi.org/10.3390/foods11091185>.
9. In praise of artificial food. Aeon. Vylucheno iz URL: <https://aeon.co/ideas/artificial-food-has-made-human-civilisation-possible>.
10. Isabella, R, Cecilia, S, Silke, H, Luuk, G & Leo, F (2023) Marcelis Resources for plant-based food: Estimating resource use to meet the requirements of urban and peri-urban diets. *Food and energy security*, 12 (3), 17. <https://doi.org/10.1002/fes3.462>.
11. I sztuczni produkty kharchuvannia [And artificial food products]. Ni.biz.ua – sait navchalnoi informatsii. Vylucheno iz URL: http://ni.biz.ua/8/8_5/8_51654_zanyatie.html (in Ukrainian).
12. Klymenko, M. M., Vinnikova, L. H. & Bereza, I. H. (2006) *Tekhnolohiia miasa ta miasnykh produktiv. Pidruchnyk [Technology of meat and meat products. Textbook]*. Kyiv, Vyshcha osvita, 640 (in Ukrainian).

13. Kopytec', N. G., & Voloshyn, V. M. (2020). Suchasnyj stan ta tendencii' rynku m'jasa [Current state and trends of the meat market]. *Ekonomika APK – Economics of agro-industrial complex*, 6, 59.
14. Markina, I. A. & Bol'shakova, Je. L. (2019). Osoblyvosti funkcionuvannja ta tendencii' rozvytku rynku m'jasa ta m'jasnoi' produkci' v Ukraїni [Features of functioning and tendencies of development of the market of meat and meat products in Ukraine]. *Ukraїns'kyj zhurnal prykladnoi' ekonomiky*, 4 (4), 119–128 (in Ukrainian).
15. McClements, D. J. & Grossmann, L. (2021) The science of plant-based foods: Constructing next-generation meat, fish, milk, and egg analogs. *Compr. Rev. Food Sci. Food Saf*, 20, 4049–4100.
16. Motuzka, Yu. & Koshelnyk, A. (2019) Rynok analogiv molochnykh produktiv roslynnoho pokhodzhennia: svitovi trendy [The market of analogues of plant-based dairy products: global trends]. *Tovary i rynky*, 38–50 [https://doi.org/10.31617/tr.knute.2019\(31\)04](https://doi.org/10.31617/tr.knute.2019(31)04) (in Ukrainian).
17. Röhling, M., Stensitzky, A., Oliveira, C. L. P., Beck, A., Braumann, K. M., Halle, M., Führer-Sakel, D., Kempf, K., McCarthy, D. & Predel, H.G. (2021) Effects of a protein-rich, low-glycaemic meal replacement on changes in dietary intake and body weight following a weight-management intervention. The ACOORH trial. *Nutrients*, 13, 376.
18. Samoichuk, K. O. (2020) Innovatsiini tekhnolohii ta obladnannia haluzi. Pererobka produktiv roslynnytstva [Innovative technologies and equipment of the industry. Processing of plant products]. Melitopol, Tavri State Agro-Technological University named after Dmytro Motorny, Liuks, 311 (in Ukrainian).
19. Savchuk, Yu. Yu. (2017) Sposoby otrymannia bilkovykh produktiv z roslynnoi syrovyny [Methods of obtaining protein products from vegetable raw materials]. *Podilsky Visnyk: agriculture, technology, economy*, 26, 64–71. (in Ukrainian).
20. Savenko, I. I. & Sedikova, I. O. (2021) Innovatsii shliakh do zabezpechennia liudstva produktamy kharchuvannia [Innovation is the way to provide humanity with food products]. 81-st scientific conference of teachers of the Odessa National Academy of Food Technologies. Collection of theses, April 27–30. Odesa, Odesa National Academy of Food Technologies, 323–325 (in Ukrainian).
21. Synthetic and Artificial Food Products. Encyclopedia. Vylucheno iz URL: <https://encyclopedia2.thefreedictionary.com/Synthetic+and+Artificial+Food+Products>.
22. Synthetic Foods. Grocery.com. Vylucheno iz URL: <https://www.grocery.com/synthetic-foods>.
23. Technology is ready for synthetic foods. Are you?. The Guardian. Vylucheno iz URL: <https://www.theguardian.com/sustainable-business/2014/dec/17/synthetic-foods-technology-labeling-gmo>.
24. The corporate push for synthetic foods. Navdanya international. Vylucheno iz URL: <https://navdanyainternational.org/the-corporate-push-for-synthetic-foods-false-solutions-that-endanger-our-health-and-damage-the-planet>.
25. The Difference Between Natural and Artificial Foods. Yahoo. Vylucheno iz URL: <http://surl.li/ntlor>.

Babanov I. H., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, National University of Food Technologies, Kyiv, Ukraine

Babanova O. I., Senior Lecturer, National University of Food Technologies, Kyiv, Ukraine

Mykhailov V. M., Doctor of Technical Sciences, Professor, State University of Biotechnology, Kharkiv, Ukraine

Shevchenko A. O., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, State University of Biotechnology, Kharkiv, Ukraine

Prasol S. V., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, State University of Biotechnology, Kharkiv, Ukraine

Application of innovative technology for obtaining functional food products based on vegetable raw materials

An urgent problem in the food industry is the replacement of protein isolates derived from genetically modified sources of raw materials. Active searches for new sources of vegetable protein from genetically unmodified crops are underway.

The article considers the issue of functional of artificial food products based on plant raw materials, i.e. food production in a fundamentally new way. The systematization and generalization of developments on the technique and technology of obtaining protein isolates from plant raw materials, as well as the analysis of prospects for the development of technological solutions, the creation of resource-saving technologies and environmentally friendly production of artificial food.

The results of scientific research obtained so far provide convincing evidence of the possibility of food production using fundamentally new methods. The term "functional foods" refers to products that are made using proteins and other nutrients of natural origin, but their composition, structure, appearance and set of properties are artificially formed.

Today, functional food products with high biological value and exquisite taste are of particular interest. These products are distinguished not only by their usefulness for health, but also contribute to satisfying the gastronomic preferences of consumers. They open the way to new possibilities in the field of nutrition, allowing people to get not only the necessary nutrients, but also to enjoy food with new, unexpected characteristics.

Works in this direction, aimed at obtaining functional food products, have a double purpose. First, they create products that imitate traditional mincemeat products. This technology is relatively simple, and the resulting products are relatively cheap and easy to use. Secondly, work in this direction is aimed at creating products with a non-crushed fibrous structure, especially in meat products, which is one of the most valuable forms of nutrition. This approach opens the way to new opportunities for people who want to maintain a healthy lifestyle or choose a vegetarian diet. Functional foods that reproduce the texture of traditional foods and at the same time are enriched with useful components can become an important element in a balanced diet, helping to meet nutritional needs without the need to use animal products.

The importance of artificial food in the creation of functional food allows: to reduce the cost and increase food production in the existing village economic base due to reduced losses and the use of non-food raw materials; to achieve the required level of food security, to solve the problem of child and medical nutrition, nutrition in unusual conditions.

Key words: proteins, functional foods, fiber, wet spinning, analogue, diluents.

РОЗРОБКА КОНСТРУКЦІЇ МЕХАНІЗМУ АВТОМАТИЗОВАНОГО ВІДБОРУ І ПОДАЧІ ЖИВЦІВ У САДЖАЛКАХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ КУЛЬТУР

Єрмаков Сергій Володимирович

завідувач навчально-наукової лабораторії «DAK GPS»
Заклад вищої освіти «Подільський державний університет»,
м. Кам'янець-Подільський, Україна
ORCID: 0000-0002-6840-5309
ermkov@gmail.com

Одним із перспективних напрямів розвитку біоенергетики є вирощування енергетичної сировини на плантаціях швидкорослих деревних порід, зокрема, верб, тополь та інших культур, здатних до легкого відновлення надземної частини після її зрізання. У статті проаналізовано сучасні тенденції вирішення проблеми швидкого нарощування площ насаджень енергетичної верби і виявлено, що одним з чинників, що гальмують процес є недостатнє опрацювання автоматизації технологічних процесів. Зокрема, зростання продуктивності агрегатів для садіння гальмує потреба в більшості технічних рішень використання праці саджальника. В роботі встановлено емпіричне завдання розробити автоматизовану саджалку для рослин, що висаджуються здерево'янілими живцями. Для розробки механізму, що забезпечить безперебійне і рівномірне надходження живців до сошника саджалки, було проведено аналіз існуючих технічних рішень. Окремі параметри знаходились експериментальним шляхом, в результаті чого було виявлено оптимальні кути нахилу стінок щільного бункера, раціональну ширину вивантажувального вікна, що забезпечуватиме повне і безупинне вивантаження живців при відсутності дії на них сторонніх сил (коливання, вібрації, тощо) і з ними. На основі проведених попередніх досліджень було синтезовано ряд рішень, які були використані при розробці нової конструкції механізму вивантаження живців. Розроблена конструкція механізму автоматизованої подачі живців у машину для садіння енергетичної верби захищена патентом і втілена у однорядній секції, робота якої була апробована в польових умовах. Такий механізм дозволяє звести ручну працю саджальника до завантаження щільного бункера попередньо орієнтованими в один бік живцями, що, залежно від об'єму щільного бункера, можна здійснювати на кінцях гону. Отримані у роботі результати можуть у подальшому слугувати для уточнення й вдосконалення машин, що працюють з поштучним відбором стержнеподібних матеріалів.

Ключові слова: енергетичні культури, енергетична верба, саджалка, автомат подачі, машина для садіння, живці.

DOI <https://doi.org/10.32782/msnau.2023.4.4>

Вступ. Інтенсивний розвиток світової енергетики створює попит на дедалі більші обсяги виробництва енергії, а з огляду на сучасні реалії екологічності та прагнення країн до енергонезалежності, дедалі більше уваги приділяється розвитку альтернативних джерел енергії. За різними оцінками до 2050 року майже 40% енергетичних потреб буде покриватись за рахунок відновлювальних джерел енергії, зокрема близько 30% – за рахунок біоенергетики (Sinchenko et al., 2015). Головним пріоритетом розвитку біоенергетики для багатьох країн є використання різних високопродуктивних біоенергетичних культур. Одним із перспективних напрямів є вирощування енергетичної сировини на плантаціях швидкорослих деревних порід, зокрема, верб, тополь та інших культур, здатних до легкого відновлення надземної частини після її зрізання. Передовий досвід з цих питань демонструють європейські країни, які почали активно впроваджувати вирощування енергетичної сировини плантаційними методами ще на початку 18 ст. Поштовхом до розвитку цього напрямку стало загострення світової енергетичної кризи (Kucher et al., 2023).

В Україні в останні роки ця тенденція набула особливого поширення, тому актуальним стало питання швидкого зведення у промислових масштабах плантацій енергетичних рослин, особливо різних сортів верб.

Для вирощування верби на великих плантаціях розроблено низку спеціальних машин для вирощування і збирання енергетичної верби (Mudryk et al., 2017; Hutsol et al., 2021). Технологія роботи з цією культурою має ряд своїх особливостей, тому не рідко деякі аспекти залишаються не достатньо вивченими. Зокрема, проблемним залишається питання автоматизованого садіння енергетичної верби, адже розмноження відбувається живцями, які зазвичай закладаються вручну саджальниками, що не лише обмежує продуктивність агрегату, а й не може гарантувати високої якості виконання роботи. Деякі спроби автоматизації процесу були втілені через створення агрегату, сировиною для садіння якого є довгі прутки. Закладання прута в них і надалі здійснюється вручну, проте далі така машина розрізає вербовий прут на живці безпосередньо під час садіння і заробляє їх у ґрунт з ущільненням його навколо живця, що забезпечує високий відсоток приживання (Manzone et al., 2014; Talagai et al., 2020). Прикладом такої машини є садильна машина Energy Planter датської компанії Egedal. Перевагами такої технології є те, що значно зменшується людський фактор, покращується якість садивного матеріалу (ріжеться безпосередньо перед садінням), з'являється можливість паралельного водіння при догляді і збиранні врожаю та, відповідно, менше пошкодження вкорінених саджанців при цьому (Kravchuk et al., 2013; Roik et al.,

2015). Однак така машина є досить дорогою для українського споживача і не дає можливості повністю обійтися без саджальника і вимагає ретельно підготовлених довгих прямих прутів.

В більшості ж випадків застосовуються простіші машини, де садивним матеріалом є живці енергетичної верби завдовжки 20...25 см та діаметром 0,7...1,4 см (Frączek et al., 2005; Roik et al., 2015). Зазвичай закладання матеріалу в таких машинах є ручним, то ж завданням нашого дослідження є розробка такого автомата, який би забезпечив безперебійну, поштучну видачу живців з деякого масиву і тим самим звільнив би місце саджальника.

На сьогодні робота над удосконалення процесу садіння рослин продовжується. Існує багато праць, що аналізують як теоретичні аспекти автоматизації (Bartenev, 2012; Miwa et al., 1991; Galle et al., 2012 і т.п.), так і автоматизацію конкретного виду рослин (Usenko, 2010; Asmolovskyi et al., 2004, та ін.) і навіть до впровадження робототехніки в процес садіння (Kutz et al., 1994; Mao et al., 2014; Liu et al., 2019 і т.д.). Проте кожен конкретний вид рослин потребує конкретного підходу. Зокрема, енергетична верба потребує врахування особливостей здерев'янілих живців як садивного матеріалу.

Основною перешкодою у подальшому підвищенні продуктивності саджалок є обмеженість можливостей людини у подачі живців – 40–60 шт./хв, що відповідає швидкості поступального руху машини 0,8...2,1 км/год. В цих умовах важливо замінити працю оператора засобами автоматизації, тому актуальним є пошук перспективних технологічних процесів та конструкцій робочих органів для автоматизованої подачі живців в машини для садіння енергетичних деревних культур, що структурно можна відобразити схемою рис. 1 (Zyma et al., 2006; Yermakov et al., 2021).

На рис. 1 знаком питання виділена позиція, що відповідає за подачу живців від ємкостей з розсадою до місця садіння. В сучасних машинах для садіння енергетичної верби цей процес виконується винятково вручну (Yermakov, 2017; Hutsol et al., 2018).

Проаналізувавши різноманітні конструкції, ми дійшли висновків, що для підвищення продуктивності саджалок необхідно удосконалити процес подачі живців від ємкостей до садильного апарату. Також необхідно використовувати проміжні накопичувачі живців, що створює буфер, який компенсує невідповідність продуктивності садильного апарату і можливостей людини. Але це лише частково вирішує питання підвищення продуктивності і зменшення частки ручної праці.

Створення механізмів для автоматизованої подачі живців у садильний апарат чи безпосередньо до місця посадки є важливим науковим завданням на шляху збільшення продуктивності садильних машин.

Матеріали і методи досліджень. В роботі встановлено емпіричне завдання розробити автоматизовану саджалку для рослин, що висаджуються здерев'янілими живцями. Для розробки механізму, що забезпечить безперебійне і рівномірне надходження живців до сошника саджалки було розроблено план дій, що включає:

– Попередньо проведено аналіз існуючих засобів автоматизації садіння живців (Yermakov, 2017a; Hutsol et al., 2018). На даному етапі, крім рішень, безпосередньо пов'язаних з садінням енергетичної верби і тополі, де переважно застосовується праця саджальника для поштучного закладання живців, було також проаналізовано технічних рішень по вирішенню даної проблеми у розсадосадінні і лісівництві (Yermakov et al., 2021; Yermakov et al., 2018).

– Розроблено математичну модель двохскатного бункера з регульованим вивантажувальним вікном і кутами нахилу стінок, та виведено формулу руху масиву живців відповідно до цієї математичної моделі (Yermakov, 2019; Ivanyshyn et al., 2020; Yermakov et al., 2021).

– Розроблено лабораторний стенд (рис. 2) і проведено дослідження по виявленню закономірностей вивантаження живців (Yermakov et al., 2018; Yermakov et al., 2022) та деяких його параметрів.

Емпіричні дослідження проводились за матрицями двофакторного експерименту в результаті чого було виявлено оптимальні кути нахилу стінок щільного

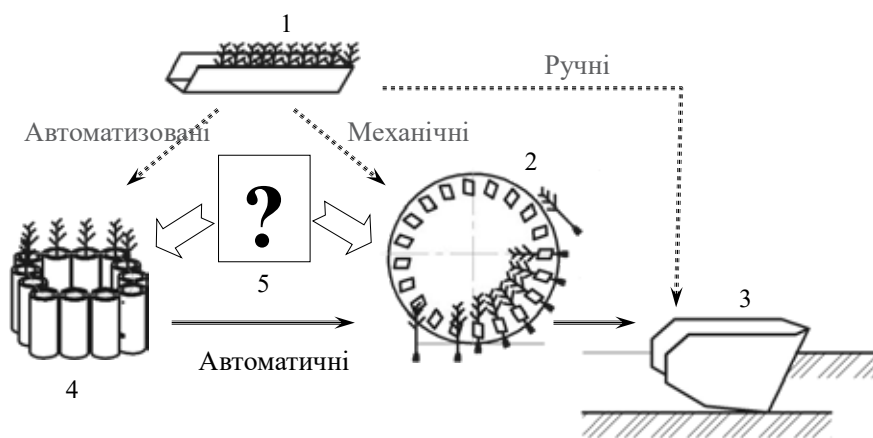


Рис. 1. Структурно-логічна схема виконання операцій процесу садіння живців енергетичної верби:

1 – місткості з розсадою; 2 – садильні апарати; 3 – сошники чи борозноутворююче обладнання;

4 – накопичувачі садивного матеріалу; 5 – механізм подачі живців



Рис. 2. Лабораторний стенд для дослідження параметрів щілинного бункера

бункера, раціональну ширину вивантажувального вікна, що забезпечуватиме повне і безупинне вивантаження живців при відсутності дії на них сторонніх сил (коливання, вібрації, тощо) і з ними.

На основі проведених попередніх досліджень було синтезовано ряд рішень, які були використані при розробці нової конструкції механізму вивантаження живців.

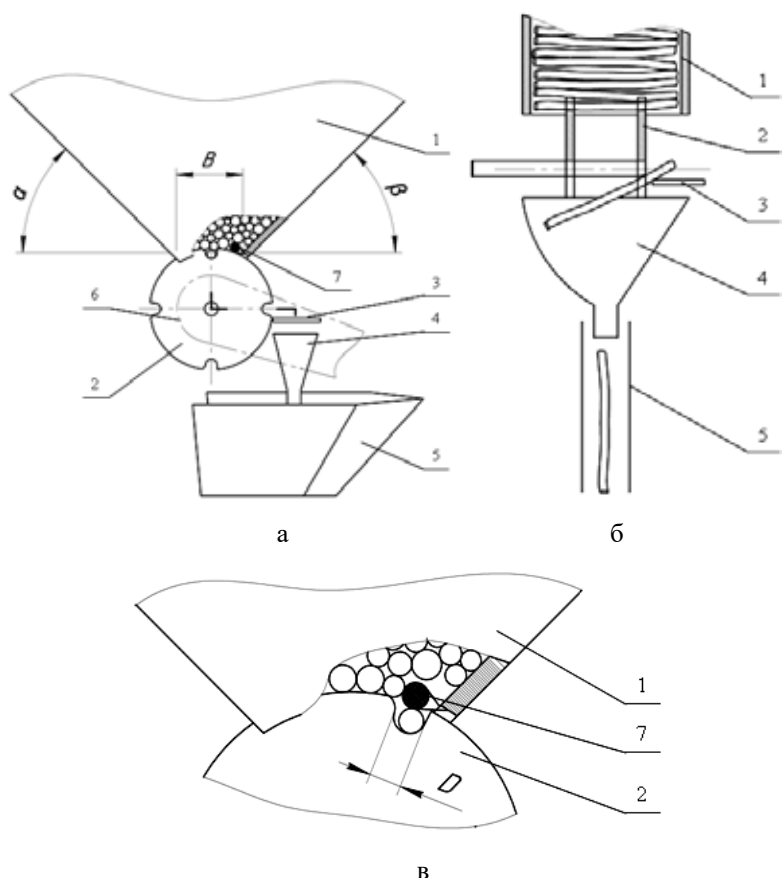


Рис. 3. Конструктивна схема автомата для подачі живців

в сошник: а – вигляд на автомат садіння збоку (з частковими розрізами); б – поперечний переріз машини по А-А;

в – схема роботи відокремлювача живців; 1 – щілинний бункер, 2 – барабан із комірками, 3 – упор, 4 – направляюча лійка; 5 – сошник; 6 – гнучка передача (ланцюгова); 7 – чистик

Результати. На підставі лабораторних досліджень було виявлено, що підбираючи раціональні параметри щілинного бункера можна досягти повного висипання з нього стержнеподібних матеріалів з неідеальною формою (живців). Ці параметри було закладено в механізмі автоматизованого відбору і подачі живців з щілинного бункера (Ivanushyn et al., 2023).

В основу розробки було поставлено задачу підвищення надійності та зниження затрат праці на процес садіння живців, за рахунок розробки автомата для подачі їх в сошник, який забезпечує можливість отримання рівномірного розвантаження бункера та безперебійної поштучної видачі садивного матеріалу до місця садіння.

Для вирішення поставленої задачі пропонується конструкція автомата для подачі живців в сошник, в якій накопичувальною ємністю є щілинний бункер, що утворений за допомогою двох похилих стінок. Стінки бункера створюють звуження, утворюючи внизу вивантажувальне вікно (рис. 3). Бункер виконано так, щоб живці розташовувались у ньому між двома вертикальними паралельними стінками, відстань між якими відповідає розміщенню живців впоперек з зазором. Робочими елементами автомата є барабан з комірками, упор та направляюча лійка (рис. 3).

Щілинний бункер заповнюється шаром живців, які під дією гравітації прагнуть просуватись до вивантажувального вікна. Звуження шару живців перед їх поштучним відбором здійснюється звуженням бункера у нижній частині, аж до формування краями стінок розвантажувального вікна. Ширина бункера відповідає розміщенню живців впоперек з зазором для вільного їх переміщення. Кут нахилу похилих стінок бункера α і β повинен бути не менше 40° , що забезпечить вільний схід живців під дією гравітаційних сил. Для уникнення можливостей склепувань, ширина розвантажувального вікна бункера B , для живців діаметром $10 \dots 18$ мм повинна становити не менше 8 см.

Барабан виконано в вигляді двох дисків з комірками. Диски розміщено на відстані $0,3 \dots 0,5$ довжини садивного матеріалу, що дозволяє приймати живці навіть з дефектами форми. Комірки виконано такими, щоб забезпечити затримання в них одного живця і вільного сходу інших (рис. 3в). Їх ширина і глибина повинні становити $1,3 \dots 1,8$ діаметрів живців, а форма забезпечувати плавний вихід. Для вільного сходу надлишкових живців на передній стінці бункера встановлено підпружинений чистик. Діаметр чистика повинен відповідати середньому діаметру живців і мати достатню амплітуду, щоб заходити в комірки барабана не менше $1/3$ глибини. У місці спадання садивного матеріалу з комірок барабана з одного боку встановлено упор, що забезпечує

зміну горизонтального положення в одному напрямку. Під упором встановлена направляюча лійка, яка остаточно орієнтує живці в вертикальне положення. Лійка внизу закінчується садивною трубою з якої садивний матеріал входить в щілину підготовлену сошником.

Перед початком роботи машини обладнаної даним автоматом для подачі живців в сошник в щілинний бункер завантажують садивний матеріал так, щоб верхні його частини були з боку упора. Живці в бункері продовжують зберігати своє орієнтування, поступово рухаючись до вивантажувального вікна бункера під дією гравітаційних сил. При русі агрегату за допомогою гнучкої (ланцюгової) передачі приводиться в дію барабан з комірками. Живці, які потрапляють на дно комірки фіксуються там, а інші видаляються за рахунок форми задньої стінки комірки та підпружиненого чистика. При обертанні барабана, живці, які потрапили в його комірки, виводяться з-під бункера і в деякому положенні випадають з комірки, зустрічаючись верхньою частиною з упором, завдяки чому їх положення змінюється з горизонтального на похиле лише в визначеному напрямку і живець продовжує рухатись нижньою частиною вперед. В напрямлюючій лійці садивний матеріал остаточно набуває вертикального положення і надходить у сошник, у виконану ним щілину, після чого його положення фіксується загортаючими чи прикочуючими засобами. Величина кроку садіння живців може регулюватись зміною передавального відношення гнучкої передачі приводу або кількістю комірок на барабані.

Обговорення. Запропонований механізм вміщує у собі деякі рішення і принципи, які застосовуються для подібних пристосувань до розсадосадильних машин, а також для саджалок, що використовуються у лісівництві (Zuma et al., 2006; Voitiuk et al., 2008). Зокрема, постає необхідність попереднього орієнтування і підготовки садивного матеріалу, як у касетних механізмів розсадо садіння.

Водночас рішення по гравітаційному вивантаженню садивного матеріалу не можуть в повній мірі відповідати більшості виконань у розсадосадильних лісосадильних автоматизованих машинах (Hutsol et al., 2018; Mudryk et al., 2017). Це пов'язано з специфікою живців, які дозволяють припускати їх рух, як рух стержнеподібних матеріалів. Натомість гравітаційне вивантаження циліндричних деталей з бункерів, в тому числі щілинних, широко поширене в деяких галузях промисловості та верстатобудування.

Розроблена конструкція механізму автоматизованої подачі живців у машині для садіння енергетичної верби захищена патентом (Ivanishyn et al., 2023) і втілена у однорядній секції, робота якої була апробована в польових умовах. Такий механізм дозволяє звести ручну працю



Рис. 4. Загальний вигляд польової установки, обладнаної автоматом для подачі живців у сошник

саджальника до завантаження щілинного бункера попередньо орієнтованими в один бік живцями, що, залежно від величини щілинного бункера, можна здійснювати на кінцях гону. А, отже, задачу звільнення процесу садіння від праці саджальника і, тим самим, автоматизації роботи саджалки можна вважати виконаною.

Висновки. В умовах зростаючої потреби швидкого нарощування площ насаджень енергетичних культур виникає проблема з наявним технічним парком для цих цілей. Зокрема, підвищення продуктивності саджалок гальмує використання праці саджальників для закладання садивного матеріалу. Розробка механізму поштучного відбору і подачі живців енергетичної верби до сошника дозволить суттєво збільшити ефективність садіння як в плані якості виконання робіт, так і в плані збільшення продуктивності агрегату.

Розроблена конструкція автомату подачі живців енергетичної верби у сошник дозволяє здійснювати безперебійний поштучний відбір попередньо орієнтованих живців енергетичної верби з щілинного бункера і подачу їх у сошник. Це дозволяє автоматизувати процес під час руху агрегату вздовж гону, а відповідно і зникає потреба у саджальнику, який би супроводжував саджалку увесь час виконання технологічного процесу.

Отримані у роботі результати можуть у подальшому слугувати для уточнення й вдосконалення машин, що працюють з поштучним відбором стержнеподібних матеріалів.

Бібліографічні посилання:

1. Abhijit, K., Mathur, S. M., Gaikwad, B. B. (2018). Automation in Transplanting: A Smart Way of Vegetable Cultivation. *Current Science*, 115, no. 10: 1884–92. <https://www.jstor.org/stable/26978519>.
2. Aijun, G., Xiaoyu, L., Jialin, H., Zhilong, Z., Ji, Z., Jun, C. (2018). Design and experiment of automatic directing garlic planter. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2018, 34(11). pp. 17–25. <https://doi.org/10.11975/j.issn.1002-6819.2018.11.003>.
3. Appavoo, I., Marionneau, A., Berducat, M., Merckx, B., Olivier, N. (2016). A high yield automatic tree planting machine. 5th International Conference on Machine Control & Guidance MCG 2016, Vichy, France. p. 5.
4. Bendera, I.M., Rozdorozhniuk, P.I., Tkach, O.V. (2011). Proektuvannia mekhanizovanykh tekhnologichnykh protsesiv u roslynnytstvi [Design of mechanized technological processes in crop production]. Kamianets-Podilskyi: FOP Sysyn O.V. 556 p (in Ukrainian).
5. Buchholz, T., Volk, T.A. (2011). Improving the Profitability of Willow Crops—Identifying Opportunities with a Crop Budget Model. *Bioenerg. Res.* 4, pp. 85–95. <https://doi.org/10.1007/s12155-010-9103-5>.
6. Huk, Ya.V. (2021). Vykorystannia pobichnoi produktsii kukurudzy v enerhetychnykh tsiliakh. [Use of corn by-products for energy purposes]. *Perspektyvy rozvytku terytorii: teoriia i praktyka* [Prospects for the development of territories: theory and practice]. Kharkiv: KhNUMH. pp. 363–367. (in Ukrainian).
7. Borys, M.M., Yermakov, S.V. (2017). Perspektyvy avtomatyzatsii sadinnia zhyvtsiv enerhetychnykh kultur [Prospects for automation of planting cuttings of energy crops]. *Zbirnyk naukovykh prats Mizhnarodnoi naukovoï konferentsii* [Collection of scientific works of the international conference]. Kamianets-Podilskyi, 2017. pp. 23–26. (in Ukrainian).
8. Bush, C., Volk, T.A., Eisenbies H. (2015). Planting rates and delays during the establishment of willow biomass crops. *Biomass and Bioenergy*. V. 83, pp. 290–296 <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2015.10.008>.
9. Dziedzic, K., Łapczyńska-Kordon, B., Mudryk, K. (2017). Decision support systems to establish plantations of energy crops on the example of willow (*Salix viminalis* L.). *Scientific achievements in agricultural engineering, agronomy and veterinary medicine polish ukrainian cooperation*. Vol. 1, No. 1, pp. 150–160.
10. Edelfeldt, S., Verwijst, T., Lundkvist, A., Forkman, J. (2013). Effects of mechanical planting on establishment and early growth of willow. *Biomass and Bioenergy*. V. 55, P. 234–242. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2013.02.018>.
11. Ericsson, K., Rosenqvist, H., Ganko, E., Pisarek, M., Nilsson, L. (2006). An agro-economic analysis of willow cultivation in Poland. *Biomass and Bioenergy*. V. 30, Issue 1, pp. 16–27 <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2005.09.002>.
12. Frączek, J., Mudryk, K. (2005). Jakości sadzonek wierzby energetycznej w aspekcie sadzenia mechanicznego [Quality of energy willow seedlings in terms of mechanical planting]. *Inżynieria Rolnicza [Agricultural Engineering]*, 6 (66), pp.159–167 (in Polish).
13. Galle, D.T. (2012). Development of an automated precision planter for establishment of *Miscanthus giganteus*. Purdue University. ProQuest Dissertations Publishing, 2012. 10156261.
14. Hutsol, T., Glowacki, S., Mudryk, K. (2021). Agrobiomass of Ukraine – Energy Potential of Central and Eastern Europe (Engineering, Technology, Innovation, Economics). Monograph. Warsaw.
15. Hutsol, T., Yermakov, S., Firman, Ju., Duganets, V., Bodnar, A. (2018). Analysis of technical solutions of planting machines, which can be used in planting energy willow Renewable Energy Sources. *Engineering, Technology, Innovation*. pp. 99–111. https://doi.org/10.1007/978-3-030-13888-2_10.
16. Ivanyshyn V.V., Yermakov S.V., Hutsol T.D., Mykhailova L.M., Kucher O.V. Avtomat podachi zhyvtsiv enerhetychnoi verby u soshnyk [Automatic feeding of energy willow cuttings into the coulter]. Patent Ukrainy № 152256. 11.01.2023 (in Ukrainian).
17. Ivanyshyn, V., Yermakov, S., Ishchenko, T., Mudryk, K., Hutsol, T. (2020). Calculation algorithm for the dynamic coefficient of vibroviscosity and other properties of energy willow cuttings movement in terms of their unloading from the tanker. *E3S Web of Conferences*, 154, 04005. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202015404005>.
18. Kravchuk, V., Novokhatskyi, M., Kozhushko, M., Dumych, V., Zhurba, H. (2013). Na shliakhu do stvorennia plantatsii enerhetychnykh kultur [On the way to creating energy plantations]. *Tekhnika i tekhnologii APK [Agricultural machinery and technologies]*. № 2 (41) (in Ukrainian).
19. Kucher, O.V., Yermakov, S.V. (2023). Metodolohiia marketynhovykh doslidzhen bioekonomichnykh protsesiv [Methodology of marketing research of bioeconomic processes]. *Podilskyi visnyk: Silske hospodarstvo, tekhnika. [Podilsky Visnyk: agriculture, technology]*. № 38. pp.132–139. <https://doi.org/10.37406/2706-9052-2023-1.19> (in Ukrainian).
20. Kutz, L.J., Craven, J.B. (1994). Evaluation of photoelectric sensors for robotic transplantation. *Applied Engineering in Agriculture*, 10 (1), pp.115–121.
21. Liu, K., Cheng G. and Kong, Z. (2019) Beidou agricultural machinery automatic driving software design, 2019 IEEE 4th Advanced Information Technology, *Electronic and Automation Control Conference (IAEAC)*, pp. 1770–1775, <https://doi.org/10.1109/IAEAC47372.2019.8997712>.
22. Lys, S.S. (2009). Ohliad tekhnologii hazyfikatsii derevyny [Review of wood gasification technology]. *Naukovyi visnyk NLTU Ukrainy* [Scientific Bulletin of the National Technical University of Ukraine]. Lviv (in Ukrainian).
23. Mao, H., Han, L., Hu, J., Kumi, F. (2014). Development of a pincette-type pick-up device for automatic transplanting of greenhouse seedlings. *Applied engineering in agriculture*, 30(4), pp. 547–556.
24. Manzone, M., Balsari, P. (2014). Planters performance during a very Short Rotation Coppice planting. *Biomass and Bioenergy*. V. 67, pp.188–192, <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2014.04.029>.
25. Mitkov, V., Kiurchev, S., Nurek, T., Chorna, T., Ihnatiev, Ye. (2021). Scientific bases of aggregation of combined units on the basis of an integrated tractor. Monograph. Warsaw.
26. Miwa, Y. (1991). Automation of plant tissue culture process. In Automation in biotechnology: a collection of contributions presented at the Fourth Toyota Conference, Aichi, Japan, Amsterdam: Elsevier.

27. Mudryk, K., Bendera, I., Jewiarz, M. (2017) Scientific achievements in agricultural engineering, agronomy and veterinary medicine: Polish-Ukrainian cooperation: scientific monograph. State Agrarian and Engineering University in Podilya, Agriculture University in Kraków, vol. I, Kraków, Traicon, 2017.
28. Mudryk K, Hutsol T., Ovcharuk O. (2021) Określenie rozłożenia pędów wierzby energetycznej [Determining the distribution of energy willow cuttings]. Trends and challenges of modern agricultural science. Kyiv. pp. 20–22 (in Polish).
29. Roik, M.V., Sinchenko, V.M., Fuchylo, Y.D. (2015). Energetychna verba: tehnologiya vy'roshhuvannya ta vy'kory'stannya [Energy willow: cultivation technology and usage]. LLC "Nilan-LTD", Vinnitsa. 340 p. (in Ukrainian).
30. Sinchenko, V., Fuchylo, Ya., Humentyk, M. (2015). Koryhuvannya dla verby [Adjustments for willow]. The Ukrainian Farmer (in Ukrainian).
31. Talagai, N., Marcu, M.V., Zimbalatti, G., Proto, A.R., Borz, S.A. (2020). Productivity in partly mechanized planting operations of willow short rotation coppice. *Biomass and Bioenergy*. V. 138, 105609. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2020.105609>.
32. Voitiuk, D.H., Yatsun, S.S., Dovzhyk, M.Ia. (2008). Silskohospodarski mashyny: osnovy teorii ta rozrakhunku. [Agricultural machines: basics of theory and calculation]. Sumy: VTD Universytetska knyha. 543p. (in Ukrainian).
33. *Willowpedia*. Retrieved: <https://www.youtube.com/user/Willowpedia>. Access: 20.10.2021.
34. Yermakov, S. (2017). Kierunki optyimizacji maszyn dla sadzenia wierzby energetycznej [Directions for optimizing machines for planting energy willow]. Skróty referatów i posterów Konferencji Naukowej pt. Inżynieria produkcji rolniczej i leśnej [Abbreviations of papers and posters of the Scientific Conference entitled: Agricultural and forestry production engineering]. Warszawa, 8-9 czerwieca 2017. pp. 75–77. (in Polish).
35. Yermakov, S.V. (2017). Prospects for improvement of constructions for planting energy crops cuttings. *Podilian Bulletin: agriculture, engineering, economics*. V. 2. pp. 37–45.
36. Yermakov, S. (2019). Application of the laplace transform to calculate the velocity of a two-phase fluid modulated by the movement of cuttings of an energy willow (*Salix Viminalis*). *Teka. Quarterly journal of agri-food industry*. V. 2. pp. 71–78.
37. Yermakov, S.V., Hutsol, T.D. (2018). Features of the heterogeneous rod-like materials outflow (by example of energy willow cutting). Technological and methodological aspects of agri-food engineering in young scientist research, pp. 55–68.
38. Yermakov S.V., Hutsol T.D. (2021). Investigation of the process of gravitational unloading of energy willow cuttings in the conditions of static and dynamic arches. *Engineering of nature management*, Vip. 3, pp. 97–109.
39. Yermakov, S.V., Hutsol, T.D., Garasymchuk, I.D., Vusatyi, M.V. (2022). Patterns of the movement of rod-form materials in the process of their pumping out of hopper. *Bulletin of Sumy National Agrarian University. The series: Mechanization and Automation of Production Processes*, V. 2 (48), pp. 21–27 <https://doi.org/10.32845/msnau.2022.2.4>.
40. Yermakov, S.V., Hutsol, T.D., Potapskyj, P.V., Garasymchuk, I.D. (2021). Structuring the process of automation of planting plants of energy willow. *Bulletin of Sumy National Agrarian University. The series: Mechanization and Automation of Production Processes*, V. 3 (45), pp. 10–17. <https://doi.org/10.32845/msnau.2021.3.2>.
41. Yermakov, S.V., Hutsol, T.D., Mykhailova, L.M. (2021). Rozrakhunkovi formuly vyznachennia shvydkosti vyvantzahennia zhyvtsiv enerhetychnoi verby z tochky zoru hidrodynamichnykh bahatofaznykh system [Calculation formulas for determining the rate of discharge of energy willow cuttings from the point of view of hydrodynamic multiphase systems]. *Podilian Bulletin: Agriculture, Engineering, Economics*, V. 34 (in Ukrainian).
42. Yermakov, S.V., Hutsol, T.D. (2021). Strukturuvannya protsesu avtomatyzatsii sadinnia zhyvtsiv enerhetychnoi verby [Structuring the process of automation of planting plants of energy willow]. *Bulletin of Sumy National Agrarian University*, V. 3 (45) (in Ukrainian).
43. Yermakov, S., Tulej, W., Shevchuk, I. (2018). Analiz konstruktsiy avtomativ sadinnia [Construction analysis means of planting automation]. *Trends and prospects for the development of science and education in the conditions of globalization*. V. 34. Pereiaslav-Khmelnytskyi. pp. 615–619 (in Ukrainian).
44. Zaika, P.M. (2011). Teoriia silskohospodarskykh mashyn. T. 1 (4.1). Mashyny ta znariaddia dla obrobittu gruntu. [Theory of agricultural machines. T.1 (4.1). Machines and tools for soil cultivation]. Kharkiv: Oho. 444 (in Ukrainian).
45. Zyma, I.M., Maliutin, T.T. (2006). Mekhanizatsiia lisohospodarskykh robot [Mechanization of forestry works]. Kyiv: INKOS. 488 p. (in Ukrainian).

Yermakov S. V., head of the educational and scientific laboratory "DAK GPS", Higher educational institution «Podillia State University», Kamianets-Podilskyi, Ukraine

Development of the design of the mechanism for automated cuttings selection and feeding in energy cultures planters

One of the promising directions of the development of bioenergy is the cultivation of energy raw materials on plantations of fast-growing tree species, in particular, willows, poplars and other crops capable of easy restoration of the above-ground part after its cutting. The article analyzes modern trends in solving the problem of rapid expansion of the area of energy willow plantations, and it is found that one of the factors slowing down the process is insufficient development of the automation of technological processes. In particular, the growth of the productivity of planting units is hampered by the need for most technical solutions for the use of the planter's labor. The paper sets an empirical task of developing an automated planter for plants planted with lignified cuttings. An analysis of existing technical solutions was carried out to develop a mechanism that would ensure uninterrupted and uniform supply of cuttings to the opener of the planter. Individual parameters were found experimentally, as a result of which the optimal angles of inclination of the walls of the slotted hopper, the rational width of the unloading window, which will ensure full and continuous unloading of cuttings in the absence of external forces (oscillations, vibrations, etc.) and with them, were found.

On the basis of previous studies, a number of solutions were synthesized, which were used in the development of a new design of the cuttings unloading mechanism. The developed design of the mechanism for the automated supply of cuttings in the machine for planting energy willow is protected by a patent and embodied in a single-row section, the operation of which was tested in field conditions. This mechanism allows you to reduce the manual work of the planter to loading the slotted hopper with cuttings previously oriented in one direction, which, depending on the size of the slotted hopper, can be carried out at the ends of the furrow. The results obtained in the work can further serve to clarify and improve the machines that work with piece-by-piece selection of rod-like materials.

Key words: energy crops, energy willow, planter, feeding machine, planting machine, cuttings.

ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ КОНФІГУРАЦІЇ ВІДЦЕНТРОВОГО РАДІАЛЬНОГО ВЕНТИЛЯТОРА З ВИКОРИСТАННЯМ ПРОГРАМНИХ КОМПЛЕКСІВ SOLIDWORKS ТА ANSYS CFX

Мельник Віктор Іванович

доктор технічних наук, професор
Державний біотехнологічний університет, м. Харків, Україна
ORCID: 0000-0002-1176-2831
victor_melnik@ukr.net

Зеленський Андрій Петрович

аспірант
Державний біотехнологічний університет, м. Харків, Україна
ORCID: 0000-0002-0364-5571
alexey2009mkh@gmail.com

Зеленський Олексій Петрович

аспірант
Державний біотехнологічний університет, м. Харків, Україна
ORCID: 0000-0001-9819-9086
alexey2009mkh@gmail.com

З розвитком комп'ютерних та розрахункових систем більшого та ефективного застосування отримали Computational Fluid Dynamics modeling (CFD-моделювання), що базується на розрахунку систем рівняння збереження маси та енергії та рівнянь, які описують рух течій в лопаточних машинах. Все це дає можливість суттєвої економії часу та матеріальних ресурсів у порівнянні з проведенням експериментальних досліджень, а також провести оптимальну інтерпретацію фізичних, геометричних параметрів та граничних умов досліджуваного об'єкта. У даній статті розглянуто можливість застосування програмного комплексу ANSYS 19.0 CFX для тривимірного чисельного моделювання газодинамічних процесів, які відбуваються у Відцентровому Радіальному Вентиляторі (ВРВ). На підставі розрахунків були побудовані аеродинамічні характеристики ВРВ, аналіз яких дав можливість отримати уявлення, про процеси, які відбуваються в проточній частині вентилятора при різних конструктивних виконаннях: № 1, № 2 та № 3 при різних значеннях витрати повітря G_m . Програмний комплекс ANSYS 19.0 CFX дає можливість отримати чисельні значення параметрів, а також провести візуалізації поведінки параметрів, в проточній частині вентилятора.

Програма ANSYS дозволяє вибрати ВРВ відповідної конфігурації та здійснити розрахунки при заданих розрахункових моделях потоку повітря: ідеальна чи в'язка рідина (в якості модельного середовища), ламінарний чи турбулентний потік повітря, розріджене чи стиснене середовище, двомірне чи тривимірне завдання.

У цій статті досліджується робота ВРВ, зокрема процеси проходження ідеального, не стисливого модельного середовища через його проточну частину в тривимірному середовищі. Прийнята модель турбулентності для тривимірної течії Menter's Shear Stress Transport (SST-модель перенесення зсувних напруж), що є гібридною моделлю між $k-\omega$ моделями турбулентності. Таким чином, SST-модель поєднує в собі стійкість та точність стандартної $k-\omega$ моделі в пристінкових областях і $k-\epsilon$ моделі на відстані від стінок. Отримали можливість побачити картину розподілу тиску вздовж проточної частини, поля векторів швидкостей та руху повітряного потоку для обґрунтування та аналізу результатів.

Ключові слова: модель турбулентності, повний тиск, статичний тиск, повний ККД вентилятора, статичний ККД вентилятора, кут входу потоку, кут виходу потоку.

DOI <https://doi.org/10.32782/msnau.2023.4.5>

Постановка проблеми. У пневматичній системі сівалки важливим вузлом є вентилятор. Від того, який повний тиск він видає залежить успішність роботи всієї пневматичної системи. Дослідження процесу створення повного тиску P_v вентилятором в пневматичній системі сівалки, для визначення оптимальних параметрів і режимів роботи пневмосистеми, є метою роботи. Програмою дослідження передбачається розробка експериментальної дослідної установки та дослідження її роботи.

Матеріали і методи дослідження. Тиск розрідження, створюваний вентилятором, викликається передачею повітря енергії від робочого колеса, що обертається (РК).

Теоретичний повний тиск P_v , що розвивається вентилятором (за відсутності втрат), визначається за рівнянням Ейлера, що лежить в основі розрахунку всіх видів лопаткових машин, що обертаються (1) (Anderson et al., 2020; Anderson, 1995):

$$P_v = \rho(u_2 c_{2u} - u_1 c_{1u}) \quad (1)$$

де ρ – щільність повітря (газу), кг/м^3 , u_1 – окружна швидкість на вході у робоче колесо, м/с , u_2 – окружна швидкість на виході з робочого колеса, м/с , c_{1u} – проекція абсолютної швидкості на окружний напрямок при вході в робоче колесо, м/с , c_{2u} – проекція абсолютної швидкості на окружний напрямок при виході на робоче колесо, м/с .

Швидкості c_{1u} та c_{2u} являють собою швидкість закручування потоку.

Рівняння (1) показує, що теоретичний тиск вентилятора залежить тільки від щільності середовища, окружної швидкості і швидкості закручування потоку. Для збільшення величини теоретичного повного тиску P_v вентилятора необхідно, виходячи з рівняння (1), щоб другий член « $-u_1 c_{1u}$ » став позитивним та арифметичне значення c_{1u} збільшувалося. Це можна досягти встановленням вхідного направляючого апарату (ВНА), який закручуватиме повітряний потік назустріч обертанню РК. Що стосується першого члена рівняння (1), то при рівних діаметрах коліс і при однаковій окружній швидкості u_2 швидкість закручування c_{2u} у вентилятора з лопатками, загнутими вперед (РК з лопатками загнутими у бік обертання), завжди буде більше за величиною, ніж у вентилятора з лопатками, загнутими назад. У цьому переконуємось побудувавши трикутники швидкостей повітряного потоку на виході з РК (Babu, 2021; Bask, 1955). Отже, вентилятори з лопатками, загнутими вперед, будуть створювати більший тиск, ніж вентилятори з лопатками, загнутими назад. Для зменшення втрат при вході в РК необхідно згладити повітряний потік, а це досягається завдяки установці кокіля (пристрій, що забезпечує плавний, ненаголошений перехід повітряного потоку у вхідну частину РК). Значить створивши відцентровий радіальний вентилятор з лопатками загнутими вперед, вхідним направляючим апаратом та кокілем на вході дасть більший повний тиск P_t , а відповідно і статичний тиск P_{sv} .

На основі проведеного регресійного аналізу робочих процесів ВРВ, одержано рівняння регресії у вигляді наступного полінома:

$$\hat{Y} = 11370,97 + 1780,91x_1 + 227,78x_2 + 430,28x_3 + 490,34x_1x_2 - 399,66x_1x_3 + 163,47x_1x_4, \quad (2)$$

де $\hat{Y}$ – математичне очікування показника параметра оптимізації (тобто повний тиск P_v); x_1 , x_2 , x_3 та x_4 – фактори процесу, що вивчається.

Так фактор x_1 висловлює частоту обертання РК ЦРВ, об/хв.

Фактори x_2 та x_3 виражають значення кута входу β_1 та кута виходу β_2 повітряного потоку, а відповідно впливають на значення c_{1u} і c_{2u} .

А фактор x_4 показує кількість лопаток на РК вентилятора.

Розглядаючи рівняння регресії, ми бачимо, що для збільшення $\hat{Y}$ необхідно збільшити $x_2 \rightarrow \beta_1$ та $x_3 \rightarrow \beta_2$. Тобто рівняння (2) підтверджується рівнянням Ейлера (1).

З цією метою для підтвердження цієї теорії досліджуємо роботу відцентрового радіального вентилятора (ЦРВ) даного виконання.

Результати. Створимо модель ВРВ із такими геометричними параметрами:

- вхідний кут потоку $\beta_1 = 50^\circ$;
- вихідний кут потоку $\beta_2 = 110^\circ$;
- кількість лопаток $z = 24$ шт.;
- діаметр вхідного патрубку $D_0 = 0,135$ мм;
- діаметр на вході в РК $D_1 = 0,140$ мм;
- діаметр на виході з РК $D_2 = 0,400$ мм;
- розміри і форма равліка залишаються незмінними (виконані за розмірами заводського виконання);
- наявність ВНА з кутом виходу повітряного потоку $\alpha_2 = 140^\circ$;
- наявність пристрою кокіль.

Частота обертання РК у заданому дослідженні приймає $n_{PK} = 5000$ об/хв. Позначимо цю модель № 1.

Для наочності і порівняння руху та показників потоку повітря в проточній частині ВРВ, розглянули та зробили розрахунок двох інших варіантів ВРВ. На відміну від основного варіанту ВРВ:

- модель без наявності ВНА та кокіля, назовемо її № 2;
- модель, що має ВНА, але не має кокіля, назовемо її № 3.

У програмі Solidworks побудовано 3D-твердотільну геометричну розрахункову модель проточної області даного вентилятора, а для подальшого розрахунку переведено в програмний комплекс ANSYS 19.0 CFX, дивимося рис.1А, 1В і 1С.

Аналіз вентиляторів, трьох різних варіантів, проводили порівнянням їх аеродинамічних параметрів, а також порівнюючи значення параметрів потоку повітря, в проточній частині ВРВ (Mironov, et al 2008; Barlit, 1992). Значення параметрів повного P_v , і статичного тиску P_{sv} , а також значення ККД ВРВ отримуємо за допомогою програми ANSYS 19.0 CFX. Маючи такі дані, можливо побудувати аеродинамічну характеристику ВРВ (Chichkin, 1984; Chung, 2002).

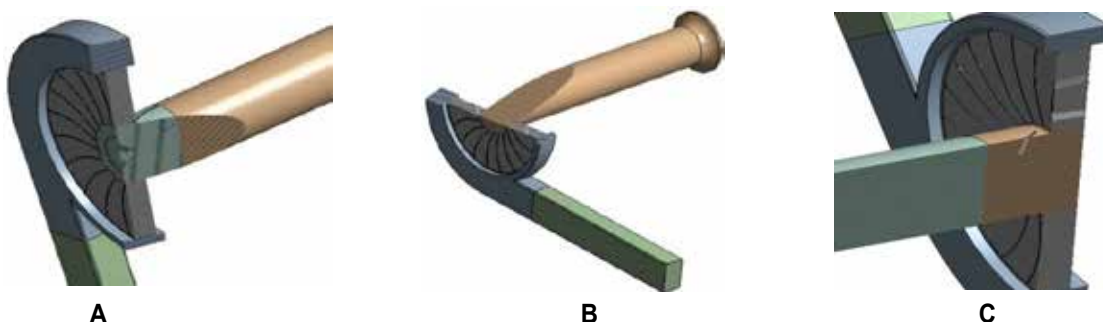


Рис. 1. Розрахункова твердотільна геометрична 3D-модель:

А – варіант № 1 з ВНА та кокілем у ВРВ; В – варіант № 2 ВРВ; С – варіант № 3 зі ВНА ВРВ

З цією метою для вибраних моделей автоматично будується сітка кінцевих елементів у модулі ANSYS MESH. Точність розрахунку залежить від якості елементів у сітці. Приклад побудови сітки показано на рис. 2.

Кількість елементів сітки даної моделі № 1 становить 1 988 095 шт., а вузлів – 3 815 945 шт.

Створена твердотільна геометрична розрахункова модель ЦПВ варіант № 1 ANSYS CFX (Myronov & Oleksenko, 2016; Jeffreys, 1999) складається з п'яти частин рис. 3:

1) перша частина – це вхідна область під назвою "Trump01" (нерухома), виконана у формі циліндра. Область описує простір, що використовується для розрахунку BPB, має вхідну поверхню – «Inlet», вихідну поверхню – «Outlet Trump01» і поверхню стінку – «WallTrump01»;

2) друга частина – це область під назвою «Trump 02» (нерухома), виконана у формі циліндра, в якій знаходяться ВНА та кокіль. Ця частина простору BPB має вхідну поверхню – "InletTrump02", вихідну поверхню – "OutletTrump02", поверхню стінку – "WallTrump02" і поверхню, яка включає в себе лопатки ВНА – "BladesTrump02";

3) третя частина – робоче колесо (РК) під назвою «Rotor03» (область, що обертається), передає потоку повітря енергію. Область потоку повітря в РК BPB має вхідну поверхню – "InletRotor03", вихідну поверхню – "OutletRotor03", поверхню стінку – "WallRotor03" і поверхню, яка включає в себе лопатки РК – "BladesRotor03";

4) четверта частина є геометричною фігурою у вигляді равілика BPB, даємо назву «Cap04» (нерухома область). Ця частина має вхідну поверхню – "InletCap04", вихідну поверхню – "OutletCap04", поверхню стінку – "WallCap04";

5) п'ята частина являє собою вихідну область Cap05 (нерухома область). Ця частина має вхідну поверхню – "InletCap05", вихідну поверхню – "Outlet", поверхню стінку – "WallCap05".

Вхідна «Inlet» і вихідна «Outlet» області досліджуваної розрахункової зони ЦПВ необхідні для формування показаних на рис. 4 граничних умов (Fletcher, 1988; Frank, 2016). При вивченні роботи BPB моделей № 2 область Trump 02 виконують без наявності ВНА та кокіля і моделі № 3 з наявністю ВНА. Робоче тіло в моделі – Air at 25 C, опція розрахунку передачі тепла – Total Energy, модель турбулентності – SST. Область обертання РК обертається із частотою $n_{pk} = 5000$ об/хв.

Тип взаємодії ротора та статора – Frozen rotor. На вході в модель: гранична умова – Opening, з параметрами входу – Total Pressure, що дорівнює 101325 Па (атмосферний тиск), параметри виходу – Mass Flow Rate (масова витрата на виході G_m , кг/с). При розрахунках нехтуємо тертям на внутрішніх стінках проточної частини. Для розрахунку різних точок характеристики змінювали масову витрату на виході вентилятора G_m , кг/с.

Задавши граничні умови розрахункової області моделі BPB у модулі ANSYS CFX Setup виробляється розрахунок BPB, дивимось рис. 4.

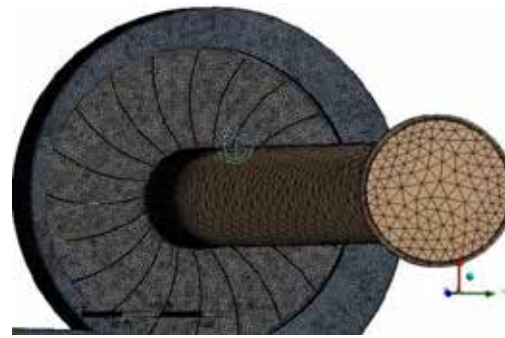


Рис. 2. Розрахункова сітка, побудована в ANSYS, для моделі № 1 з ВНА та кокілем у BPB

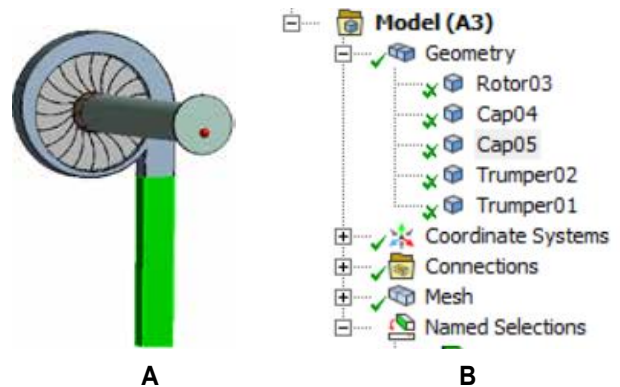


Рис. 3. Твердотільна геометрична розрахункова модель BPB варіант № 1:

А – поділ конструкції BPB на розрахункові області;

В – дерево моделі в системі ANSYS CFX

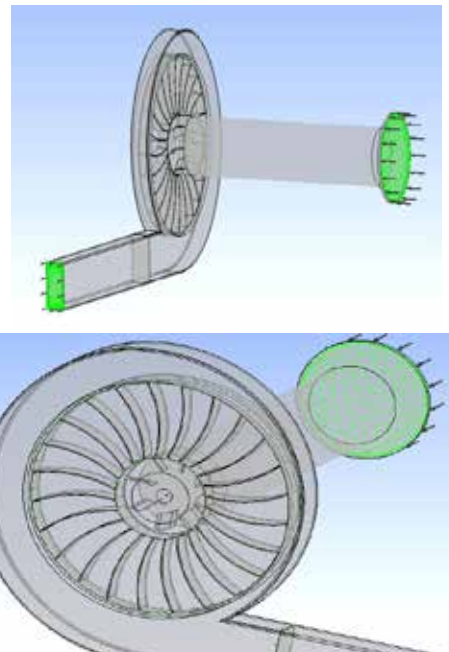


Рис. 4. Модель розрахункової області BPB у CFX-Pre

Ввівши граничні умови та задавши кількість ітерацій та точність розрахунку запускаємо модуль розрахунку Solution, дивимось рис. 5.

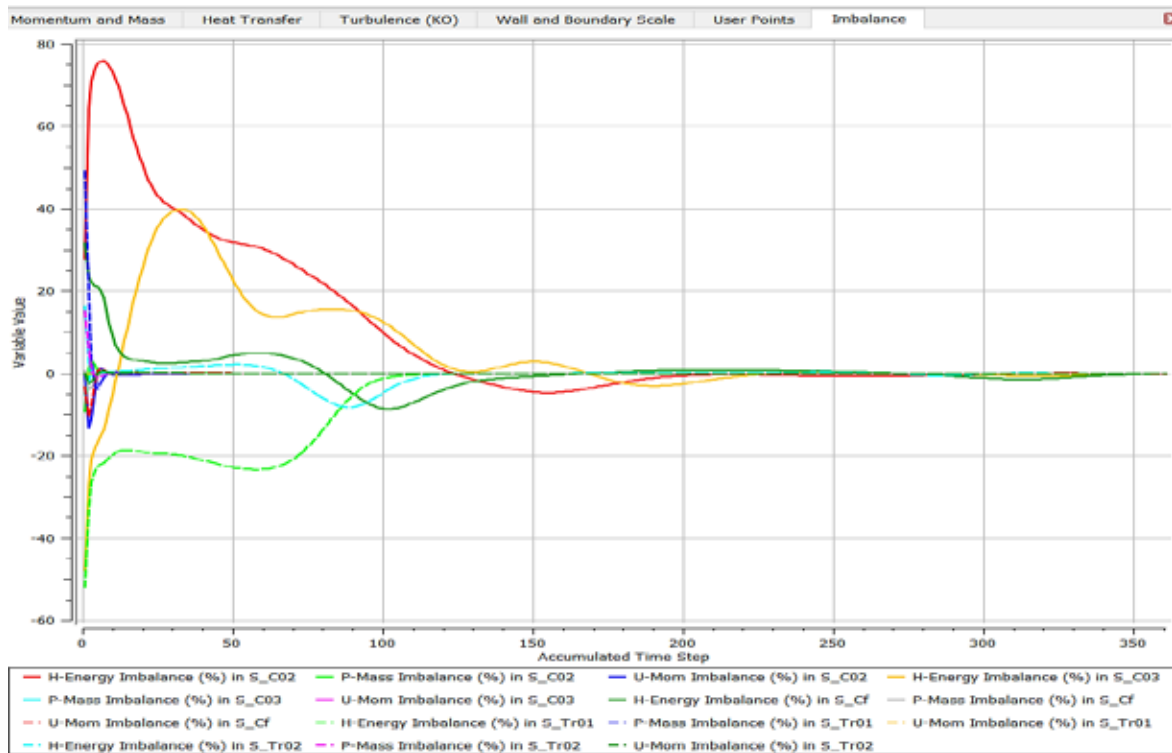


Рис. 5. Графік розрахунку моделі BPB

В подальшому розрахунок повного P_v та статичного тиску P_{sv} вентиляторів проводимо при різних значеннях витрати повітря G_m . Значення параметрів збіжності прийнято рівним 10^{-5} . Розрахункові значення

повного P_v та статичного тиску P_{sv} в залежності від значення витрати повітря G_m одержуємо у вигляді графіків для різних моделей BPB (рис. 6).

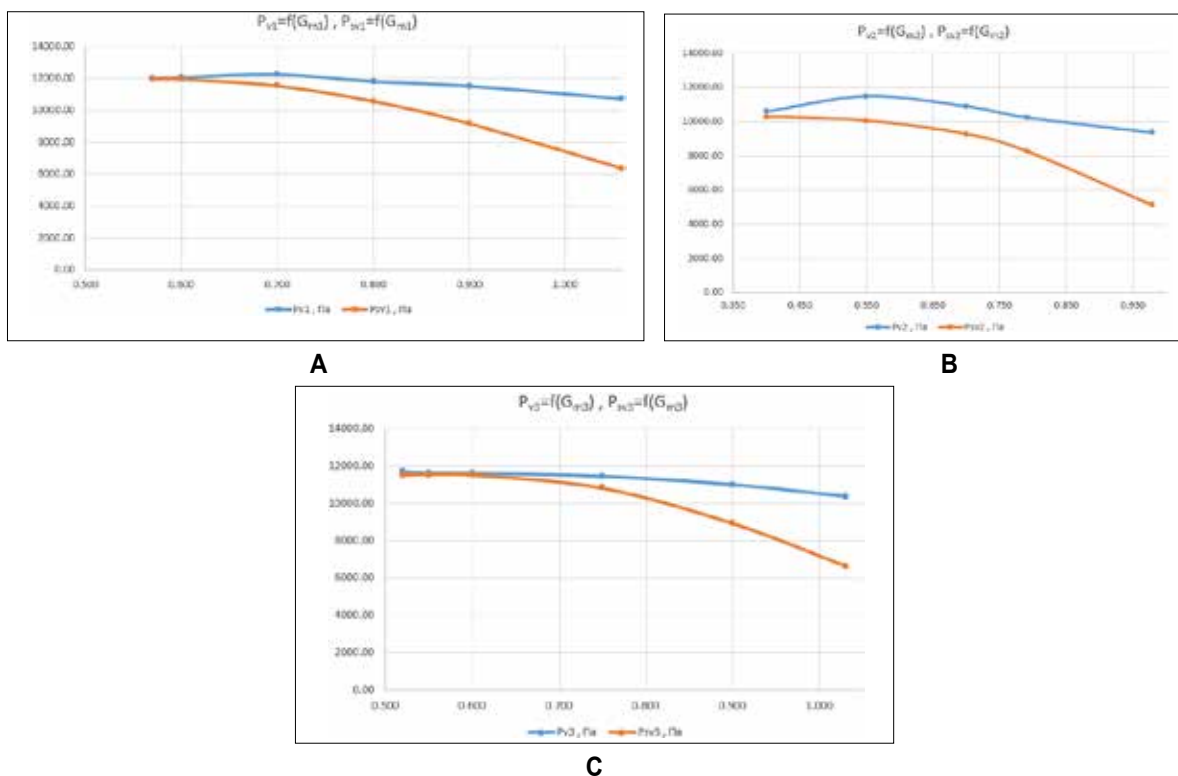


Рис. 6. Розрахований із використанням системи ANSYS 19.0 CFX, створюваний вентилятором повний P_v та статичний P_{sv} тиск в залежності від значення витрати повітря G_m для трьох варіантів моделей № 1 (А), № 2 (В) № 3 (С)

Для повноцінної роботи всієї пневматичної системи сівалки важливу роль відіграє статичний тиск, що створюється P_{sv} вентилятором. Із графіків (рис. 6) видно, що у ВРВ моделі № 1 він приблизно на 20 % більший ніж у ВРВ моделі № 2. Наявність кокіля у ВРВ призводить до зменшення втрат повітряного потоку, а значить збільшення статичного тиску P_{sv} у моделі № 1 приблизно на 17 % порівняно з моделлю № 3. Аналізуючи графіки характеристик тиску створюваного вентилятором, вибираємо ВРВ потрібної конфігурації (Hirsch, 2007; Batchelor, 2000).

Можливо також відстежити ККД повного тиску η_v та статичного тиску η_{sv} вентилятора при різних значеннях витрати повітря G_m (рис. 7).

Користуючись програмними можливостями ANSYS CFX, можливо спостерігати за поведінкою потоку повітря в проточній частині каналу вентилятора. Так отримували інформацію про розподіл і значення тиску, швидкості, температури та ряду інших параметрів потоку, що цікавлять, у різних перерізах проточної частини каналу вентилятора, на підставі якої робимо висновок про роботу вентилятора. Рисунок 8 дає можливість розглянути поведінку потоку повітря при контакті з ВНА та кокілем вбудованим у проточну частину вентилятора.

Наявність у проточній частині вентилятора ВНА та кокіля плавно змінює напрямок руху потоку повітря, а відповідно зменшує втрати в цьому місці проточної частини.

Для розуміння поведінки та величини зміни відносної швидкості потоку вздовж проточної частини вентилятора при заданому значенні витрати повітря G_m , побудовано картину зміни цього параметра в перерізі ВРВ (рис. 9А і 9В).

Для розгляду поведінки потоку повітря на вході до вентилятору та в міжлопатковому каналі, при заданому значенні витрати повітря G_m , будуємо допоміжну площину (рис. 9А). Під час руху потоку повітря прямолінійним каналом «Trumper01» відносна швидкість не змінюється. Коли потік повітря підходить до ВНА «Trumper02», його щільність збільшується і при зустрічі з кокілем потік гальмується (швидкість потоку зменшується), він плавно змінює напрямок руху і входить до РК ЦРВ. В подальшому потік повітря рухається вздовж лопаток до периферії. При цьому його швидкість збільшується. По висоті та довжині лопатки швидкість змінюється не рівномірно. Для наочності руху потоку повітря у вузлах Rotor03, Cap04 і Cap05 будуємо допоміжну площину (рис. 9В). Уздовж коритця лопатки швидкість потоку збільшується, чому сприяє передача енергії потоку повітря лопатками РК. Вдалині від лопатки потік повітря здійснює кругові рухи. Залишаючи поверхню лопаток РК, потік повітря потрапляє в равлик вентилятора «Cap04», де його швидкість зростає. При попаданні потоку повітря в Cap05 швидкість потоку повітря поступово падає.

На рисунках 10А та 10В представлена візуалізація зміни полів швидкості у різних вузлах проточної частини каналу вентилятора.

У розрахунках та аналізі роботи вентилятора є також абсолютні параметри, які розраховують відносно

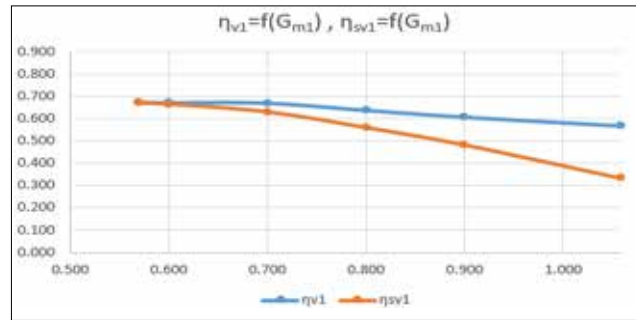


Рис. 7. Графік залежності ККД вентилятора, отримані в ANSYS 19.0 CFX для моделі № 1

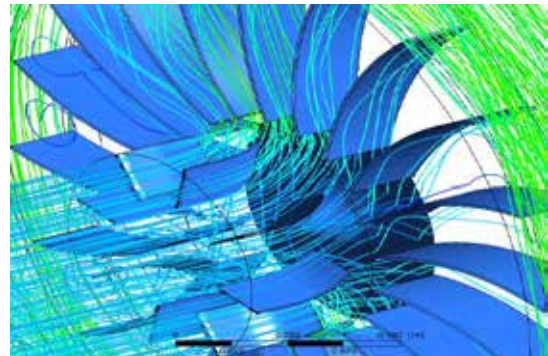


Рис. 8. Рух потоку повітря в місці встановлення ВНА та кокіля ВРВ

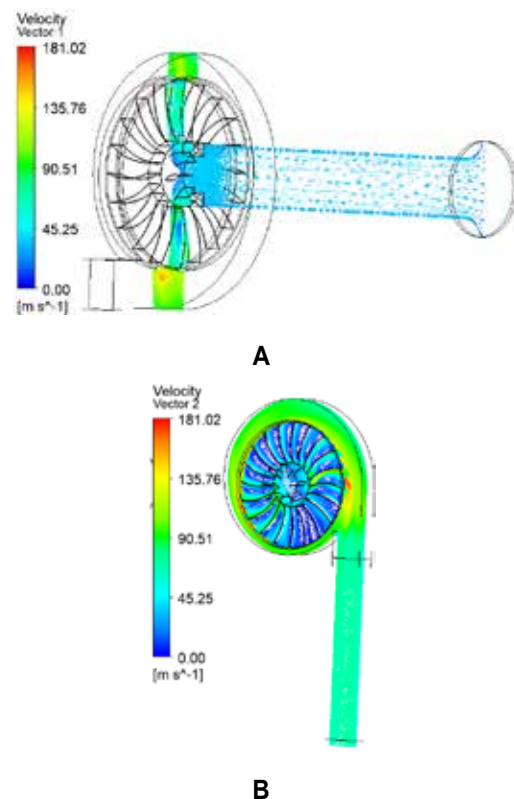
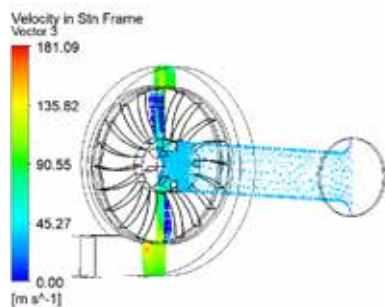
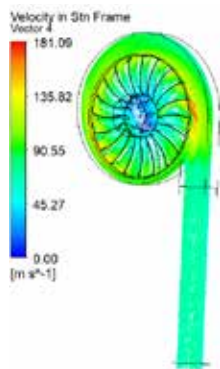


Рис. 9. Картина зміни відносної швидкості потоку повітря при проходженні таких вузлів ВРВ:
А – «Trumper01», «Trumper02» та «Rotor03»;
В – Rotor03, Cap04 і Cap05



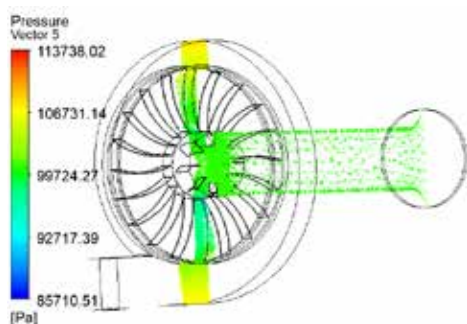
A



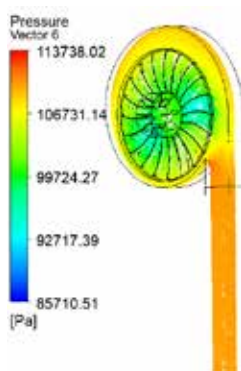
B

Рис. 10. Картина зміни абсолютної швидкості потоку повітря при проходженні таких вузлів ВРВ:

A – «Trumper01», «Trumper02» та «Rotor03»;
B – Rotor03, Cap04 і Cap05



A



B

Рис. 11. Картина зміни відносного тиску потоку повітря при проходженні таких вузлів ВРВ:

A – «Trumper01», «Trumper02» та «Rotor03»;
B – Rotor03, Cap04 і Cap05

нерухомої, пов'язаної з корпусом вентилятора системи координат. Картина зміни абсолютної швидкості потоку повітря в проточній частині вентилятора наведена на рис.10A та 10B. При русі потоку повітря прямолінійним каналом «Trumper01» абсолютна швидкість плавно змінюється. Коли потік повітря підходить до ВНА «Trumper02», його щільність збільшується і при зустрічі з кокілем потік гальмується (абсолютна швидкість потоку зменшується) він змінює плавно напрямку руху і входить до РК ВРВ. Потік повітря рухається вздовж лопаток до периферії, картина зміни величини абсолютної швидкості потоку повітря однозначна. По висоті та довжині лопатки абсолютна швидкість збільшується не рівномірно. Для наочності руху потоку повітря у вузлах Rotor03, Cap04 і Cap05 будемо допоміжну площину (рис. 10B). Цей малюнок більш точно передає поведінку потоку повітря в міжлопатковому каналі. Під час руху потоку повітря вздовж каналу равлика «Cap04» до каналу «Cap05» виходу потоку швидкість знижується.

Зміна відносного тиску вздовж проточної частини ВРВ показана на рис. 11A і 11B.

Для розгляду картини зміни тиску потоку повітря на вході у вентилятор і між лопатковому каналі, при заданому значенні витрати повітря G_m , будемо допоміжну площину (рис. 11A). При русі потоку повітря прямолінійним каналом «Trumper01» статичний тиск плавно змінюється. При підході потоку повітря до ВНА «Trumper02» та при зустрічі з кокілем напрямку потоку повітря змінюється та плавно входить до РК ЦРВ. Потік повітря рухається вздовж лопаток до периферії, змінюючи величину статичного тиску. По висоті та довжині лопатки статичний тиск змінюється не рівномірно. Для наочності зміни статичного тиску потоку повітря у вузлах Rotor03, Cap04 і Cap05 будемо допоміжну площину (рис. 11B). Вздовж коритця лопатки статичний тиск потоку змінюється. Зміна статичного тиску міжканальних ділянках відбувається нерівномірно. Залишаючи поверхню лопаток РК, потік повітря потрапляє в равлик вентилятора «Cap04», де величина статичного тиску зростає. При попаданні потоку повітря в «Cap05» значення статичного тиску повітря поступово зростає.

Колірна гама, параметрів, що цікавлять, на малюнку, а також шкала параметрів дає можливість візуального представлення поведінки потоку повітря вздовж проточної частини ВРВ.

Висновки. У цій статті розглянуто можливість застосування програмного комплексу ANSYS 19.0 CFX для обґрунтування вибору більш раціональної конфігурації ВРВ. Всі розрахунки були проведені із застосуванням SST моделі турбулентності. Порівнянням аеродинамічних характеристик ВРВ, отриманих за результатами чисельного дослідження, проілюстровано, як протікає робочий процес у вентиляторах різного виконання (№ 1, № 2 і № 3) при різних значеннях витрати повітря G_m . Отримані значення тиску дають змогу обґрунтувати вибір раціональної конструкції вентилятора. Програмний комплекс ANSYS 19.0 CFX дає можливість наочно представити картину поведінки параметрів, що описують робочі процеси

в проточній частині і вплив їх на різні вузли вентилятора. У розділі Expressions програми ANSYS CFD – Post можна отримати значення параметрів, що цікавлять, на потрібних вентилятора.

поверхнях і площинах перерізів вентилятора. Є можливість побудувати в різній колірній гамі значення параметра, що цікавить нас, в будь-якому місці проточної частини

Бібліографічні посилання:

1. Anderson Dale., John C. Tannehill, Richard H. Pletcher, (2020). Computational Fluid Mechanics and Heat Transfer., 4th Edition, Boca Raton, CRC Press, 236 p.
2. Anderson, J. D. Jr. (1995). Computational Fluid Dynamics: The Basics with Applications. New York: McGraw-Hill, 546 p.
3. Babu, V. (2021). *Fundamentals of gas dynamics* (2nd ed). Berlin: Springer, 195 p.
4. Batchelor G.K. (2000) An Introduction to Fluid Dynamics. Cambridge: Cambridge University Press, 615 p.
5. Chung, T. J. (2002). Computational fluid dynamics. [Computational fluid dynamics.], Cambridge: Cambridge University Press, 1029 p.
6. Drankovskiy V. E., Myronov K. A., Tynianova I. I. ta inshi (2022) Matematychnе modeliuвання robochoho protsesu hidromashyn : navch. posib. [Mathematical modeling of the working process of hydraulic machines: a textbook]. Kharkiv: NTU «KhPI», 406 p. (in Ukrainian).
7. Fletcher, A. J. (1988). Computational techniques for Fluid Dynamics. New York: Springer-Verlag: Berlin, 479 p.
8. Frank, M. (2016). White fluid mechanics (8th ed.). New York: McGraw-Hill Education, 849 p.
9. Hirsch, C. (2007) Numerical computation of internal and external flows (2nd ed.). Oxford: Published by John Wiley & Sons, Ltd, 695 p.
10. Ing. Dr. techn. Back O. (1955). Ventilatoren entwurf und berechnung. [Fans design and calculation] Halle (Saale), 362 p. (in German).
11. Jeffreys G., Swirles B. (1999). Methods of mathematical physics. By SIR HAROLD JEFFREYS M. A., D Sc., F.R.S. and BERTHA SWIRLES (LADY JEFFREYS) M.A., Ph.D. 3rd edition Cambridge: Cambridge University Press, 728 p.
12. Mironov K. A., Oleksenko Yu. Yu. (2019) Doslidzhennia potoku ridyny v dvovymirni i tryvymirni postanovtsi v protochnii chastyni vysokonapirnoi radialno-osovoi hidroturbiny. [Research of fluid flow in two-dimensional and three-dimensional formulation in the flow part of a high-pressure francis turbine]. Kharkiv: *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Hydraulic machines and hydraulic units*, No 1'2019, pp. 72–76.
13. Mironov K. A., Oleksenko Yu. Yu., Mironov V. K. (2018) Doslidzhennia prostorovoi techii v protochnii chastyni vysokonapirnoi radialno-osovoi hidroturbiny. [Study of the spatial flow in the flow part of the high-pressure francis turbine] Kharkiv: Bulletin of the National Technical University "KhPI". *Hydraulic machines and hydraulic units*, 46'2018, pp. 25–29.
14. Regina P. Bracy, Richard L. Parish, and Joe E. McCoy. (1999) Precision Seeder Uniformity Varies with Theoretical Spacing. Alexandria: *HortTechnology*, 9 (1)' pp. 47–50.

Melnik V. I., Doctor of Technical Sciences, Professor, State Biotechnological University, Kharkiv, Ukraine

Zelensky A. P., Postgraduate Student, State Biotechnological University, Kharkiv, Ukraine

Zelensky A. P., Postgraduate Student, State Biotechnological University, Kharkiv, Ukraine

Justification of centrifugal radial fan configuration choice using solidworks and ANSYS CFX software complexes

With the development of computer and software systems, Computational Fluid Dynamics modeling (CFD modeling) has been eliminated, which is based on the development of systems to save mass, energy and resources, which describe the flow of technology iŭ in shoveling machines. All this makes it possible to save time and material resources in comparison with experimental research, as well as to carry out an optimal interpretation of the physical, geometric parameters and the borderline minds of the researched object. Ekta. This article examines the possibility of using the ANSYS 19.0 CFX software package for trivial numerical modeling of gas-dynamic processes, such as those required by the Center Radial Fan (VRV). The aerodynamic characteristics of the air blower were analyzed on the basis of the design, analysis of which made it possible to eliminate phenomena about the processes that occur in the flow part of the fan for different design configurations: No. 1, No. 2 and No. 3 for different values. spend again G_m. The ANSYS 19.0 CFX software package makes it possible to read the numerical values of parameters, as well as visualize the behavior of parameters in the flow part of the fan.

The ANSYS program allows you to select a VRV of a specific configuration and change the size of the wind flow when specifying the size of the wind flow models: the ideal knitting is normal (in the frame of the model middle), laminar or turbulent flow to the wind, the rarefied and compressed middle, the two-worldly and the three-worldly.

This article examines the work of the VRV during the process of passing an ideal, non-crampy model medium through its flow part into a trivial medium. A turbulence model for trivimiral flow, Menter's Shear Stress Transport (SST model), which is a hybrid model between k-ε and k-ω turbulence models, has been adopted. Thus, the SST model has the same stability and accuracy as the standard k-ω model in the near-wall areas and the k-ε model at the wall-mounted area. It was possible to obtain a picture of the sub-vice of the flow part, the fields of fluid vectors and the direction of the wind flow for conditioning and analysis of the results.

Key words: turbulence model, high pressure, static pressure, high fan efficiency, static fan efficiency, flow inlet, flow out.

ЗВ'ЯЗОК МІЖ ПАРАБОЛОЮ Й ЕЛІПСОМ НА ПОВЕРХНІ КУЛІ

Несвідомін Андрій Вікторович

кандидат технічних наук, доцент

Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ, Україна

ORCID: 0000-0002-9227-4652

a.nesvidomin@gmail.com

Воліна Тетяна Миколаївна

кандидат технічних наук, доцент

Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ, Україна

Сумський національний аграрний університет, м. Суми, Україна

ORCID: 0000-0001-8610-2208

t.n.zaharova@ukr.net

Пилипака Сергій Федорович

доктор технічних наук, професор

Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ, Україна

ORCID: 0000-0002-1496-4615

psf55@ukr.net

Бабка Віталій Миколайович

кандидат технічних наук, доцент

Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ, Україна

ORCID: 0000-0003-4971-4285

babkavitaliy@ukr.net

Грищенко Ірина Юріївна

кандидат технічних наук, доцент

Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ, Україна

ORCID: 0000-0002-1000-9805

irgr@yahoo.com

У кулі та площині є спільні ознаки. У обох гаусова кривина є сталою: у площині вона рівна нулю, а у кулі вона залежить від величини радіуса. Внаслідок цього сферичні криві можуть ковзати по поверхні кулі подібно до того, як плоскі криві можуть ковзати у площині. Деякі властивості плоских кривих характерні і для їх сферичних аналогів. Якщо профіль зубця циліндричної передачі окреслений по евольвенті кола, то зубець конічної передачі теж окреслений по кривій, яка є сферичним аналогом евольвенти кола. Крім того, два еліпси можуть перекочуватися один по одному без ковзання, якщо їх осі обертання розташувати у фокусах. Те ж саме стосується і сферичних еліпсів, тільки на відміну від плоских еліпсів, у яких осі обертання паралельні, у сферичних еліпсів вони перетинаються у центрі сфери. Таку подібність між плоскими кривими та їх сферичними аналогами використовують для проектування сферичних механізмів.

У статті розглянуто побудову кривої – сферичного аналога параболі. За основу взято визначення параболі, як геометричного місця точок, рівновіддаленого від фіксованої точки – фокуса параболі і від прямої – директриси. За директрису на сфері взято екватор, як аналог прямої лінії на площині. Для зручності аналітичних викладок взято кулю одиничного радіуса. В такому випадку довжини дуг вимірюються кутами. За виведеними рівняннями було побудовано сферичні параболі, які на відміну від плоских є замкнені. Для параболі на площині всі промені, які йдуть із фокуса, відбиваються від параболі і утворюють пучок паралельних прямих. Аналогічно відбувається і на сферичній параболі з тією відмінністю, що аналогом паралельних прямих є множина меридіанів, які перетинаються в полюсі. За цією властивістю сферична параболою подібна до сферичного еліпса, у якого промені, що виходять із одного полюса, після відбиття попадають у другий полюс. Велика вісь еліпса у кутовому вимірі може набувати значень до 180° . Математично доведено, що у випадку, коли велика вісь еліпса дорівнює 90° , то сферичний еліпс одночасно є сферичною параболою. Таким чином сферична параболою є частковим випадком сферичного еліпса. Складено внутрішнє рівняння сферичної параболі у криволінійних координатах та її параметричні рівняння. За отриманими рівняннями побудовано параболі із різним значенням фокального параметра. Знайдена умова, за якої сферична параболою перетворюється у коло.

Ключові слова: сфера, криволінійні координати, внутрішнє рівняння, сферична параболою, сферичний еліпс.

DOI <https://doi.org/10.32782/msnau.2023.4.6>

Вступ. Поверхня кулі має широке застосування у різних сферах людської діяльності. Наприклад, в архітектурі для створення унікальних форм та структур. Сфера може бути використана для створення куполів, арок, а також цілих будівель з оригінальними формами. У фізиці вона використовується для моделювання різних фізичних явищ, таких як розподіл електричного заряду або гравітаційного поля. В математиці поверхня кулі є основою сферичної геометрії та тригонометрії (Данилевський та ін., 2011). Серед сферичних механізмів відомі сферичні шарніри, які надають обертового руху в різних напрямках, сферичні редуктори, які передають обертовий рух з одного валу на другий під різними кутами, сферичні підшипники, сферичні чотириланкові механізми, зокрема, карданний механізм. Все це вимагає математичного опису кривих на поверхні сфери і вивчення їх властивостей за аналогією із плоскими кривими. Конструюванню кривих на сфері у функції натурального параметра присвячені праці (Пилипака та ін., 2008; 2014). Моделювання смуг розгортних поверхонь, дотичних до поверхні кулі розглянуто в праці (Пилипака та ін., 2018). В праці (Kresan et al., 2023) на поверхні сфери побудовано некруглі колеса, які є основою для утворення аксоїдів, що можуть обкочуватися один навколо одного, обертаючись навколо осе, які перетинаються в центрі сфери. Аксоїди, в основі яких є сферичні еліпси, наведені в праці (Kresan et al., 2022). Конструювання сферичних аналогів циклоїди і евольвенти кола розглянуто в праці (Nesvidomin et al., 2023). Формоутворення сферичних епіциклоїд при обкочуванні рухомого конуса по нерухомому здійснено в праці (Пилипака та ін., 2023). Рух частинки по сферичному сегменту з вертикальними радіально встановленими лопатками розглянуто в праці (Воліна та ін., 2021). В працях (Wang et al., 2020; Guven et al., 2014; Yayli et al., 2011) розглядаються інші питання, пов'язані із поверхнею кулі.

Матеріали і методи досліджень. Криві другого порядку – парабола, еліпс і гіпербола – є конічними перерізами, оскільки конкретна крива може бути отримана при перерізі одного і того ж конуса в залежності від положення січної площини. Відповідно в математиці існує формулювання, яке вказує на спільне походження цих кривих. Якщо знайдено геометричне місце точок, у яких відношення відстані до однієї фіксованої точки площини, яка називається фокусом, до відстані до фіксованої прямої, яка називається директрисою, є величина стала, це геометричне місце точок є конічним перерізом. Вид цієї кривої залежить від величини відношення, яке називають ексцентриситетом. Якщо ексцентриситет рівний одиниці, то кривою є парабола, менше одиниці – еліпс, більший одиниці – гіпербола.

Директрисою на площині є пряма. Її внутрішньою властивістю є найкоротша відстань між двома заданими точками, через які проходить ця пряма. За аналогією на сфері така властивість притаманна колам великого радіуса. За таке коло візьмемо екватор кулі. Запишемо параметричні рівняння кулі одиничного радіуса:

$$X = \cos \varepsilon \cos \gamma; \quad Y = \cos \varepsilon \sin \gamma; \quad Z = \sin \varepsilon, \quad (1)$$

де ε і γ – широта і довгота – криволінійні координати сфери, які вимірюються кутами.

При $\varepsilon=0$ згідно рівнянь (1) отримаємо рівняння екватора. Відлік кута ε відбувається від екватора до полюса A (рис. 1а). На нульовому меридіані (при $\gamma=0$) візьмемо точку F , яку приймемо за фокус сферичної параболи. Відстань від фокуса F до екватора вимірюється кутом ε_0 , який є фокальним параметром. На рис. 1а потовщеною лінією зображено фрагмент сферичної параболи, яка проходить через точку B , а вершина розташована на нульовому меридіані посередині фокального параметра. Відстань від директриси (екватора) до точки B параболи вимірюється кутом ε вздовж меридіана, який відповідає куту γ при вершині A сферичного трикутника ABF . Ця відстань позначена двома рисками. З іншої сторони, таку ж саму відстань має відрізок BF – відстань від фокуса F до точки B параболи. Знайдемо цю відстань. Для цього розглянемо сферичний трикутник ABF (рис. 1б).

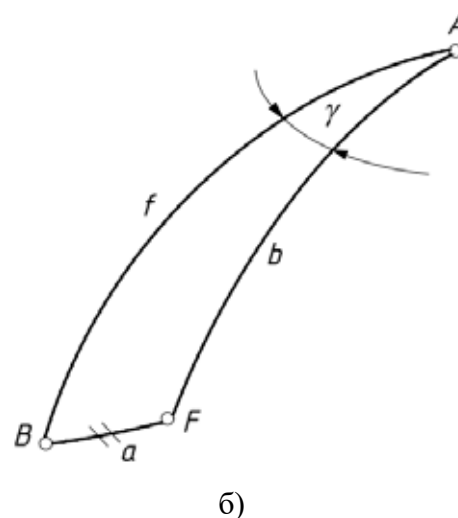
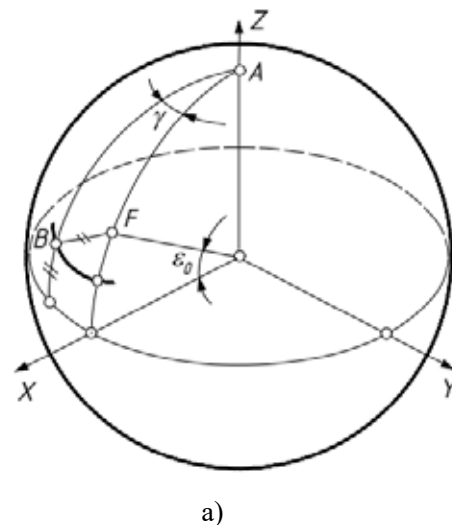


Рис. 1. Графічні ілюстрації до побудови сферичної параболи:

- а) фрагмент сферичної параболи на поверхні кулі з позначенням рівних відстаней від її точки B до фокуса F і директриси (екватора); б) сферичний трикутник ABF , у якого сторону BF потрібно знайти

У нього відомо три кути: сторони f і b , які вимірюються кутами $f=90^\circ-\varepsilon$, $b=90^\circ-\varepsilon_0$ і кут γ між цими сторонами. Нам потрібно знайти відстань від точки B до фокуса F , тобто сторону a у кутовому вимірі. З теореми синусів для косокутних сферичних трикутників можна записати:

$$\frac{\sin b}{\sin B} = \frac{\sin a}{\sin A}. \quad (2)$$

Щоб знайти кут a за формулою (2), потрібно знати кут при вершині B . Його ми знайдемо за іншою формулою:

$$\operatorname{ctg} B = \frac{\sin f \operatorname{ctg} b - \cos f \cos A}{\sin A}. \quad (3)$$

Після підстановки у формулу (3) кутів $f=90^\circ-\varepsilon$, $b=90^\circ-\varepsilon_0$ і $B=\gamma$, отримаємо:

$$\operatorname{ctg} B = \frac{\cos \varepsilon \operatorname{tg} \varepsilon_0 - \sin \varepsilon \cos \gamma}{\sin \gamma}. \quad (4)$$

Перейдемо в (4) від котангенса до синуса і підставимо отриманий вираз у (2). Розв'язавши (2) відносно кута a , отримаємо:

$$\sin a = \cos \varepsilon_0 \sqrt{\sin^2 \gamma + (\cos \gamma \sin \varepsilon - \cos \varepsilon \operatorname{tg} \varepsilon_0)^2}. \quad (5)$$

$$\cos a = \cos \varepsilon_0 \cos \varepsilon \cos \gamma + \sin \varepsilon_0 \sin \varepsilon. \quad (6)$$

Але кут a дорівнює поточному значенню кута ε (на рис. 1а дуги, що відповідають цим кутам, позначені двома рисками). Підставимо в (5) або (6) замість кута a кут ε і розв'яжемо отримане рівняння відносно ε :

$$\varepsilon = \operatorname{Arccos} \frac{\sin \varepsilon_0}{\sqrt{\sin^2 \varepsilon_0 + (1 - \cos \varepsilon_0 \cos \gamma)^2}}. \quad (7)$$

Рівняння (7) є внутрішнім рівнянням сферичної параболі. Воно встановлює взаємозв'язок між криволінійними координатами ε і γ . Підставивши (7) у рівняння сфери (1) замість ε , ми отримаємо параметричні рівняння сферичної параболі.

Зазначимо, що рівняння (6) можна знайти простішим шляхом. Дугу BF , що відповідає кутові a (рис. 1), можна

шукати, як кут між радіус-векторами, які йдуть із центра сфери до точок B і F . Координати вектора, що йде до фокуса F :

$$\{\cos \varepsilon_0, 0, \sin \varepsilon_0\}. \quad (8)$$

Координати вектора, що йде до поточної точки B сферичної параболі:

$$\{\cos \varepsilon \cos \gamma, \cos \varepsilon \sin \gamma, \sin \varepsilon\}. \quad (9)$$

Кут a між векторами (8) і (9) знаходимо за відомою формулою і отримуємо результат, аналогічний (6).

Результати досліджень. На рис. 2а побудовано сферичні параболі для різних значень фокального параметра ε_0 . Всі вони замкнені і розташовані в одній півкулі. Коли фокальний параметр $\varepsilon_0 = 90^\circ$, парабола перетворюється в коло. В цьому випадку фокус знаходиться у полюсі. Відстань від нього до будь-якої точки кола, як і від кола до екватора, вимірюється вздовж меридіана, є сталою і рівною 45° . Промені, які виходять із фокуса, після відбивання від кола повертаються назад у фокус. Для інших парабол, які не є колом, промені відбиваються від параболі і рухаються вздовж меридіанів, які є аналогом паралельних прямих на площині, і перетинаються у полюсі сфери. Якщо параболу разом із фокусом і точкою перетину відбитих променів повернути навколо осі Y на кут $\varepsilon_0/2$, то ми отримаємо зображення, представлене на рис. 2б. Будь-який промінь, що виходить із точки F , після відбиття від параболі попадає у протилежну точку, яка розташована на такій же відстані від другої вершини параболі, як точка F від першої.

Така властивість характерна для еліпса, та і сама парабола подібна до еліпса із двома фокусами. Ще однією особливістю отриманої кривої є те, що відстань між протилежними вершинами є сталою і рівною 90° незалежно від фокального параметра.

В праці (Kresan et al., 2022) наведено рівняння сферичного еліпса, форма якого залежить від двох сталих величин: великої осі ψ і відстані між фокусами θ (рис. 3б). Сам еліпс будується, виходячи із того, що сума

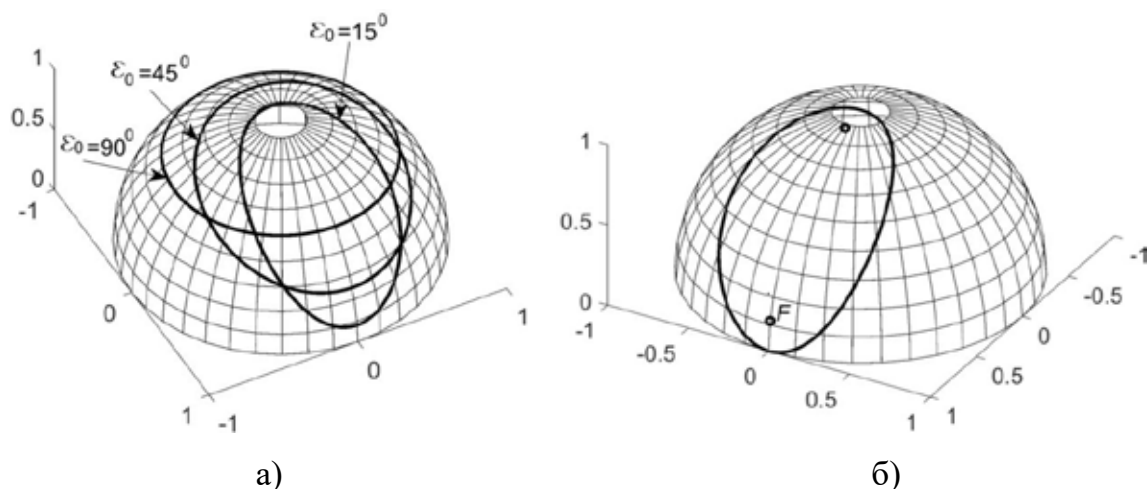


Рис. 2. Сферичні параболі на поверхні кулі:

а) сферичні параболі при різних значеннях фокального параметра; б) сферична парабола після повороту її навколо осі Y на кут $\varepsilon_0/2$

відстаней у кутовому вимірі від фокусів F і F_1 до будь-якої точки A еліпса є величина стала (рис. 3а). Внутрішнє рівняння еліпса у криволінійних координатах має вигляд (Kresan et al., 2022):

$$\varepsilon = \arctg\left(\frac{\cos \theta - \cos \psi}{\sin \psi - \cos \gamma \sin \theta}\right). \quad (10)$$

Розглянемо частковий випадок, коли $\psi=90^\circ$. На основі порівнянь рисунків 3б, 1а та 2б можна записати:

$$\psi = \theta + 2\frac{\varepsilon_0}{2} = \theta + \varepsilon_0. \quad (11)$$

Приймаючи до уваги, що $\psi=90^\circ$, запишемо:

$$\theta = 90^\circ - \varepsilon_0. \quad (12)$$

Після цього внутрішнє рівняння еліпса (10) набуває вигляду:

$$\varepsilon = \arctg\left(\frac{\sin \varepsilon_0}{1 - \cos \gamma \cos \varepsilon_0}\right). \quad (13)$$

Внутрішнє рівняння (13) складено для сфери, у якій відлік кута ε починається не від екватора, а від полюса. Для цього випадку параметричні рівняння сфери мають вигляд:

$$X = \sin \varepsilon \cos \gamma; \quad Y = \sin \varepsilon \sin \gamma; \quad Z = \cos \varepsilon, \quad (14)$$

При підстановці (13) у (14) ми отримаємо параметричні рівняння еліпса із великою віссю $\psi=90^\circ$:

$$\begin{aligned} x &= \frac{\sin \varepsilon_0 \cos \gamma}{\sqrt{\sin^2 \varepsilon_0 + (1 - \cos \varepsilon_0 \cos \gamma)^2}}; \\ y &= \frac{\sin \varepsilon_0 \sin \gamma}{\sqrt{\sin^2 \varepsilon_0 + (1 - \cos \varepsilon_0 \cos \gamma)^2}}; \\ z &= \frac{1 - \cos \varepsilon_0 \cos \gamma}{\sqrt{\sin^2 \varepsilon_0 + (1 - \cos \varepsilon_0 \cos \gamma)^2}}. \end{aligned} \quad (15)$$

Якщо ми підставимо внутрішнє рівняння (7) у параметричні рівняння сфери (1), то ми отримаємо точно такі ж рівняння, які отримані у (15). Це свідчить про те, що параметричні рівняння сферичної параболи є частковим випадком рівнянь сферичного еліпса, коли його велика вісь дорівнює 90° .

Обговорення. За внутрішнім рівнянням (9) при підстановці його у (14) можна побудувати набагато більше варіантів еліпсів, оскільки їх формою можна управляти двома сталими величинами θ і ψ .

На рис. 4а побудовані еліпси, у яких велика вісь більша за 90° . При $\theta = \psi$ еліпс вироджується у дугу меридіана між фокусами. Еліпс перетворюється в коло великого діаметра при $\psi = 180^\circ$ незалежно від значення кута. Це показано на вигляді збоку (рис. 4б) при $\theta = 90^\circ$.

З наведених прикладів і математичних викладок можна зробити висновок, що сферична парабола

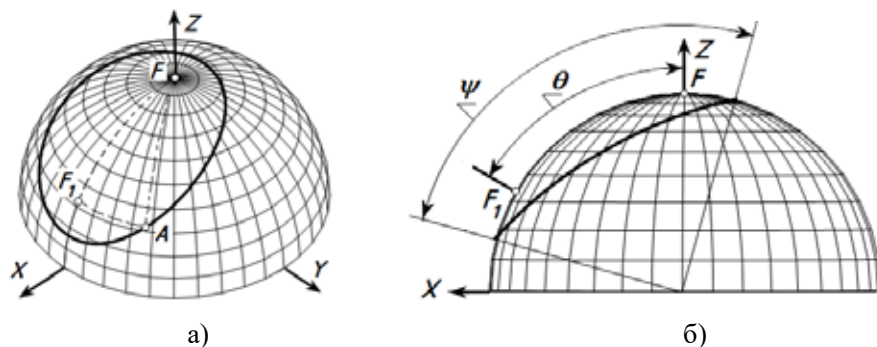


Рис. 3. Сферичні еліпси на поверхні кулі:

а) утворення сферичного еліпса за умови, що сума дуг із фокусів F і F_1 до будь-якої точки A еліпса є величина стала; б) вихідні дані для утворення сферичного еліпса: відстань між фокусами θ і велика вісь ψ

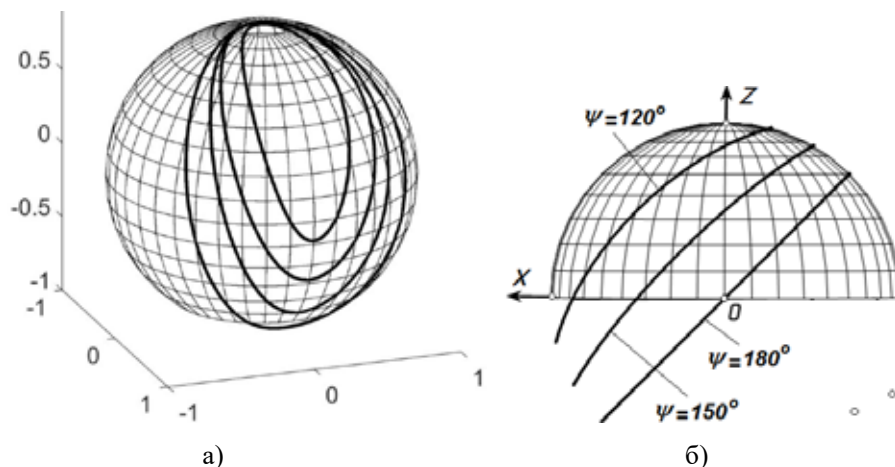


Рис. 4. Варіанти еліпсів при $\psi > 90^\circ$:

а) різні комбінації сталих θ і ψ ; б) відстань між фокусами $\theta = 90^\circ$ і різна величина великої осі ψ

є частковим випадком сферичного еліпса, коли у нього велика вісь $\psi = 90^\circ$. При цьому відстань між фокусами згідно (12) рівна $90^\circ - \varepsilon_0$.

Дослідження показали, що для кривих на сфері – сферичних аналогів кривих другого порядку на площині – не можна застосовувати поняття ексцентриситету. Внутрішнє рівняння (7) сферичної параболи було отримано за умови, що довжини дуг від поточної точки параболи до її фокуса і до директриси рівні між собою, тобто їх відношення дорівнює одиниці. При прирівнюванні цих дуг можна ввести коефіцієнт, який забезпечить інше відношення, наприклад, менше одиниці, що відповідає еліпсу на площині. Однак на кулі при такому підході отримати сферичний еліпс не вдається. Однак про спільність походження сферичних параболи і еліпса свідчить отриманий у статті матеріал.

Висновки. Плоскі криві другого порядку об'єднують у одну групу геометрична фігура – конус. Ці криві можуть бути отримані в результаті перетину конуса площиною, через що і носять назву конічних перерізів або конік. Сферичні аналоги цих кривих об'єднують інша геометрична фігура – сфера. В основі побудов вказаних кривих як на площині, так і на сфері, лежать спільні геометричні властивості цих кривих. Це підтверджується результатом, отриманим у статті. Доведено, що сферична парабола є частковим випадком сферичного еліпса, якого фіксована величина великої осі і в кутовому вимірі дорівнює прямому куту. Таким чином, сферичний еліпс із великою віссю, рівною прямому куту на поверхні сфери одиничного радіуса, одночасно є сферичною парабою.

Бібліографічні посилання:

1. Guven, I. A., Nurkan, S. K., & Karacan, M. K. (2014). Ruled Weingarten Surfaces Related to Dual Spherical Curves. *Gen. Math. Notes*, 24, 2, 10–17.
2. Kresan, T., Ahmed, A., Pylypaka, S., Volina, T., Semirnenko, S., Trokhaniak, V., & Zakharova, I. (2023). Construction of spherical non-circular wheels formed by symmetrical arcs of loxodrome. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2023, 1 (1–121), 44–50.
3. Kresan, T., Pylypaka, S., Ruzhylo, Z., Rogovskii, I., & Trokhaniak, O. (2022). Construction of conical axoids on the basis of congruent spherical ellipses. *Archives of Materials Science and Engineering* [this link is disabled](#), 2022, 113 (1), 13–18.
4. Nesvidomin, A., Pylypaka, S., Volina, T., Kalenyk, M., Shuliak, I., Semirnenko, Y., Tarelnyk, N., Hryshchenko, I., & Kholodniak, Y. (2023). Constructing geometrical models of spherical analogs of the involute of a circle and cycloid. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4 (7 (124)), 6–12.
5. Wang, Yo., Chang, Yu. (2020). Mannheim curves and spherical curves. *International Journal of Geometric Methods in Modern Physics*, 17 (07), 2050101.
6. Yayli, Yu., Saracoglu, S. (2011). Some Notes on Dual Spherical Curves. *Journal of Informatics and Mathematical Sciences*, 3 (2), 177–189.
7. Volina, T. M., Pylypaka, S. F., & Nesvidomin, A. V. (2021). Rukh chastynky po sferychnomu sehmentu z vertykalnymy radialno vstanovlenymy lopatkamy [Movement of a particle along a spherical segment with vertical radially installed blades]. *Mechanics and mathematical methods*, III, 1, 27–36 (in Ukrainian).
8. Danylevskiy, M. P., Kolosov, A. I., & Yakunin, A. V. (2011). *Osnovy sferychnoi heometrii ta tryhonometrii: navch. posib.* [Basics of spherical geometry and trigonometry: a textbook]. Khark. nats. akad. misk. hosp.-va, Kh.: KhNAMH, 92 p. (in Ukrainian).
9. Pylypaka, S. F., Hryshchenko, I. Yu., & Kresan, T. A. (2018). Modeliuvannia smuh rozghortnykh poverkhon, dotychnykh do poverkhni kuli [Modeling of striping surfaces tangent to the surface of the sphere]. *Prykladni pytannia matematychnoho modeliuvannia*, Kherson: OLDI-PLIUS, 1, 81–88 (in Ukrainian).
10. Pylypaka, S. F., Zakharova, T. M. (2014). Konstruiuvannia sferychnykh kryvykh u funktzii naturalnogo parametra [Construction of spherical curves as a function of a natural parameter]. *Naukovyi visnyk Melitopolskoho derzhavnoho pedahohichnoho universytetu imeni Bohdana Khmelnytskoho. Seriya: Matematika. Heometriia. Informatyka*. Melitopol: Vydavnytstvo MDPU im. B. Khmelnytskoho, 1, 137–145 (in Ukrainian).
11. Pylypaka, S. F., Nesvidomin, A. V. (2023). Formoutvorennia sferychnykh epitsykloid pry obkochuvanni rukhomoho konusa po nerukhomomu [Formation of spherical epicycloids when rolling a moving cone on a stationary one]. *Visnyk Khersonskoho natsionalnogo tekhnichnoho universytetu*, 2 (85), 65–70 (in Ukrainian).
12. Pylypaka, S. F. (2008). Analitichne konstruiuvannia prostorovykh ta sferychnykh kryvykh u funktzii vlasnoi duhy [Analytical construction of spatial and spherical curves as a function of their own arc]. *Heometrychne ta kompiuterne modeliuvannia*, 21. Kharkiv: KhDUKhT, 100–105 (in Ukrainian).

Nesvidomin A. V., PhD, Associate Professor, National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

Volina T. M., PhD, Associate Professor, National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine, Sumy National Agrarian University, Sumy, Ukraine

Pylypaka S. F., Doctor of Technical Science, Professor, National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

Babka V. M., PhD, Associate Professor, National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

Hryshchenko I. Yu., PhD, Associate Professor, National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

The connection between the parabola and the ellipse on the surface of the sphere

The sphere and the plane have common features. In both, the Gaussian curvature is constant: in a plane it is equal to zero, and in a sphere it depends on the radius. As a result, spherical curves can slide on the surface of a sphere in the same way that flat curves can slide in a plane. Some properties of flat curves are also characteristic of their spherical counterparts. If the profile of a tooth of a cylindrical gear is outlined along the involute of a circle, then the tooth of a conical gear is also outlined along a curve, which is a spherical analogue of the involute of a circle. In addition, two ellipses can roll over each other without slipping if their axes of rotation are located at the foci. The same applies to spherical ellipses, only unlike flat ellipses, in which the axes of rotation are parallel, in spherical ellipses they intersect at the center of the sphere. This similarity between flat curves and their spherical counterparts is used to design spherical mechanisms.

The article considers the construction of a curve – a spherical analog of a parabola. The basis is the definition of a parabola as a geometric location of points equidistant from a fixed point – the focus of the parabola and from a straight line – the directrix. The equator is taken as the directrix on the sphere, as an analogue of a straight line on a plane. For the convenience of analytical calculations, a sphere of unit radius is taken. In this case, the lengths of the arcs are measured by angles. According to the derived equations, spherical parabolas were constructed, which, unlike flat ones, are closed. For a parabola on a plane, all rays coming from the focus are reflected from the parabola and form a bundle of parallel lines. The same thing happens on a spherical parabola, with the difference that the analog of parallel lines is a set of meridians that intersect at the pole. According to this property, a spherical parabola is similar to a spherical ellipse, in which rays emanating from one pole, after reflection, enter the other pole. The major axis of the ellipse in the angular dimension can take values up to 180° . It is mathematically proven that in the case when the major axis of the ellipse is equal to 90° , then the spherical ellipse is simultaneously a spherical parabola. Thus, a spherical parabola is a partial case of a spherical ellipse. The internal equation of a spherical parabola in curvilinear coordinates and its parametric equations have been compiled. Based on the obtained equations, parabolas with different values of the focal parameter were constructed. The condition under which a spherical parabola turns into a circle has been found.

Key words: sphere, curvilinear coordinates, internal equation, spherical parabola, spherical ellipse.

ВИЗНАЧЕННЯ ВПЛИВУ ПЮРЕ КРОПИВИ-ЯБЛУКА НА ЯКІСНІ ПОКАЗНИКИ ЙОГУРТУ

Синенко Тетяна Павлівна

доктор філософії

Сумський національний аграрний університет, м. Суми, Україна

ORCID: 0000-0002-5300-5142

tetiana.synenko@snau.edu.ua

Дзюба Ярослав Сергійович

студент

Сумський національний аграрний університет, м. Суми, Україна

ORCID: 0009-0003-8664-5941

adzb033@gmail.com

Болгова Наталія Вікторівна

кандидат сільськогосподарських наук, доцент

Сумський національний аграрний університет, м. Суми, Україна

ORCID: 0000-0002-0201-0769

natalia.bolhova@snau.edu.ua

Назаренко Юлія Валентинівна

кандидат технічних наук, доцент

Сумський національний аграрний університет, м. Суми, Україна

ORCID: 0000-0003-4870-4667

nazarenko.sumy@gmail.com

Пуригін Іван Олександрович

аспірант

Сумський національний аграрний університет, м. Суми, Україна

ORCID: 0000-0003-3546-4369

ru.com.63@gmail.com

Одінцов Сергій Михайлович

аспірант

Сумський національний аграрний університет, м. Суми, Україна

ORCID: 0009-0005-1390-648X

sergii.odintsov@gmail.com

Йогурт – найпопулярніший кисломолочний продукт на споживчому ринку. Він нормалізує роботу кишечника, значно покращує травлення і полегшує засвоєння поживних речовин. Використання рослинних порошків та екстрактів для збагачення йогурту вітамінами, мінералами та фенольними сполуками, які посилюють його функціональні та антиоксидантні властивості, стає все більш актуальним. Використання композицій рослинного походження має потенціал для збільшення та збагачення асортименту кисломолочних продуктів з антиоксидантними властивостями. Метою роботи є визначення впливу пюре кропиви-яблука на якісні показники йогурту. Це дасть можливість розробити технологію йогурту та розширити асортимент кисломолочних продуктів з підвищеною біологічною цінністю. В якості основної сировини використовували молоко коров'яче, що відповідає вимогам ДСТУ 3662:2018. Як наповнювач застосовували пастеризоване пюре із кропиви і яблук у співвідношенні 1:3, 1:5, 1:15. Вміст наповнювача (пюре кропиви-яблука) варіювали в рецептурі йогуртів від 16 % до 20 %. Для встановлення оптимальної кількості наповнювача виконано дослідження якісних показників досліджуваних зразків. В роботі використовували стандартні методи дослідження. В результаті органолептичної оцінки визначено, що найбільш привабливим і гармонійним є зразок № 2 із вмістом пюре кропиви-яблука 18 %. При цьому йогурт характеризується кремово-зеленим кольором з частками внесеного наповнювача, з легким ароматом та приємним присмаком кропиви та нотками яблука. Результати фізико-хімічних та мікробіологічних досліджень показують, що виготовлені зразки йогуртів не перевищують допустимих значень відповідно норм ДСТУ 4343:2004. Результати зміни кислотності і кількості мікроорганізмів в йогуртах в процесі зберігання показали, що всі зразки мають плавну тенденцію до зниження показників, однак в межах норми протягом 33 днів зберігання. В результаті проведених досліджень рекомендовано співвідношення пюре кропиви-яблука як 1:5, а кількість наповнювача в рецептурі йогурту – 18 %.

Ключові слова: молочні продукти, йогурт, рослинна сировина, кропива, клітковина, біологічна цінність.

DOI <https://doi.org/10.32782/msnau.2023.4.7>

Вступ. Кисломолочні продукти становлять 15 % від загальної кількості всієї молочної продукції, яка виробляється на підприємствах в Україні. Попит споживачів на функціональні та натуральні молочні продукти зростає. Зокрема попит зріс на кисломолочні напої з додаванням рослинної сировини, яка у своєму складі містить вітаміни, антиоксиданти, харчові волокна й мінерали (Samilyk et al., 2022).

Йогурт – найпопулярніший кисломолочний продукт на споживчому ринку. Оскільки вони здатні нормалізувати роботу кишечника, значно покращують травлення, позитивно впливають на засвоєння поживних речовин (Goyko et al., 2022). Тому пошук нових наповнювачів на натуральній основі з високим вмістом біологічно активних сполук є актуальним завданням.

Актуальності набуває використання порошків та екстрактів з рослинної сировини з метою збагачення йогуртів вітамінами, мінеральними та фенольними сполуками, які збільшують функціональні та антиоксидантні властивості готової продукції. Використання рослинних композицій має перспективу для збагачення та розширення асортименту кисломолочних продуктів з антиоксидантною дією.

У роботі (Najgebauer-Lejko et al., 2021) представлено результати дослідження використання в технології виробництва йогуртів бузинових порошків, отриманих при осмотичній дегідратації плодів бузини з наступним висушуванням та подрібненням. Показано, що готовий продукт має привабливий сенсорний профіль – світло-бузковий колір, приємний кисло-солодкий смак з присмаком і ароматом бузини. Додавання порошку бузини до йогурту підвищує загальну кислотність та в'язкість. Також збільшується вміст сухих речовин. Проте в дослідженні не доведено вплив бузинових порошків на термін зберігання йогуртів. Це питання розкрито в наступній роботі.

Результати роботи (Abdel-Hamid et al., 2020) показують використання добавки екстракту з плодів *Siraitia grosvenorii* для збагачення пробіотичного йогурту. Показано, що після додавання екстракту відбулося покращення хімічних та фізико-хімічних показників. Готовий досліджуваний зразок з 2 % екстракту мав найвищу антиоксидантну та антибактеріальну активність, а зразок з 1 % екстракту отримав найвищі бали за сенсорними показниками.

У роботі (Abdullah et al., 2023) досліджено збагачення йогуртів *Cinnamomum verum*, *Elettaria cardamomum*, *Beta vulgaris* та *Brassica oleracea*. Проведено якісний та кількісний фітохімічний аналіз вищевказаних рослинних екстрактів перед використанням їх у приготуванні функціональних йогуртів. Результати показали збільшення вмісту золи, водоутримуючої здатності, титрованої кислотності, загальної кількості розчинних сухих речовин, фенолів та флавоноїдів. На додаток до цього, збагачені йогурти показали більшу антиоксидантну та антибактеріальну активність.

У роботі (Dabija et al., 2018) досліджено асортимент молочних і йогуртових продуктів, їх доповнення екстрактами трав, клітковиною з побічних продуктів

плодопереробної промисловості, а також свіжими спеціями. Досліджено вплив водних екстрактів на якісні характеристики йогурту, приготованих з чотирьох трав: розторопші (*Silybum marianum* L.), глоду (*Crataegus monogyna*), шавлії (*Salvia officinalis* L.) і майорану (*Origanum vulgare* L.). Остаточні результати свідчать, що фізико-хімічні та реологічні властивості йогурту з додаванням екстрактів трав були покращені порівняно з контрольним зразком після 28 днів зберігання. Згідно з отриманими даними, найкращою якістю за фізико-хімічними та реологічними властивостями був зразок з додаванням 0,5 % екстракту розторопші (*Silybum marianum* L.), тоді як з точки зору харчової цінності найкращою якістю був зразок з 1 % екстрактом майорану (*Origanum vulgare* L.).

У роботі (Kulaitienė et al., 2021) представлено результати збагачення грецького йогурту з екстрактом листя кропиви і шовковиці та порошку шипшини. Показано, що введення рослинної сировини в йогурт дозволило значно збільшити кількість усіх досліджуваних мінеральних речовин і загальний вміст фенолів. Вміст білка у досліджуваних зразках складає в діапазоні 12,9–14,3 г, кількість сахарози коливається від 19,25 до 21,29 г, а кількість фенолів зросла у 1,86–3,54 рази порівняно із контрольним зразком без добавок. Недоліком даних досліджень є використання кропиви лише як екстракту з метою збільшення фенольних речовин готового продукту. Однак інші корисні властивості кропиви, зокрема у формі порошку, не беруться до уваги.

Результати роботи (Bajaj-Zhezherun et al., 2022) показують, що кропива (*Urtica dioica*) є цінним джерелом макро- і мікроелементів і вітамінів. Вміст аскорбінової кислоти у свіжому листі кропиви складає 64,8 мг, кількість вітаміну Е у свіжій кропиві та порошку становить 1,02 та 9,52 мг відповідно, β-каротину – 19,5 і 138 мг на 100 г продукту. У складі кропиви є біологічно активні сполуки, такі як флавоноїди та фенольні кислоти. Корінь кропиви дводомної містить близько 2 % дубильних речовин, а в листях – вітаміни (Е, В, К, С), залізо, хлорофіл, каротиноїди та кумарини.

З вищевказаних даних є очевидним той факт, що використання порошків та екстрактів з рослинної сировини збагачує кисломолочні продукти вітамінами, мінеральними та фенольними сполуками, які збільшують функціональні та антиоксидантні властивості готової продукції. Використання рослинних композицій має перспективу для збагачення та розширення асортименту кисломолочних продуктів з антиоксидантною дією.

Мета роботи: визначення впливу пюре кропиви-яблука на якісні показники йогурту. Це дасть можливість розробити технологію йогурту та розширити асортимент кисломолочних продуктів з підвищеною біологічною цінністю.

Матеріали і методи досліджень. В якості основної сировини використовували молоко коров'яче, що відповідає вимогам ДСТУ 3662:2018.

Як наповнювач застосовували пастеризоване пюре із кропиви і яблука у співвідношенні 1:3, 1:5, 1:15. Вміст наповнювача (пюре кропиви-яблука) варіювали в рецептурі йогуртів від 16 % до 20 %. Рецептуру дослідних зразків йогуртів представлено в табл. 1.

Таблиця 1

Рецептура дослідних зразків йогуртів

Зразок	Вміст (г на 100 г)		
	Пюре		Йогурт 1,5 % жирності
	кропива	яблучне	
Контрольний	–	–	100
1	5	15	80
2	3	15	82
3	1	15	84

Для заквашування використовували бактеріальну закваску прямого внесення, яка складається із штамів *Lactobacillus delbrueckii ssp. bulgaricus*, *Lactobacillus acidophilus*, *Bifidobacterium lactis*, *Streptococcus thermophilus*. Йогурт виготовляти за класичною технологією резервуарним способом.

Для встановлення оптимальної кількості наповнювача виконано дослідження якісних показників досліджуваних зразків. В роботі використовували стандартні методи дослідження: масова частка вологи методом висування згідно ДСТУ 8552:2015; активну кислотність потенціометричним методом згідно ДСТУ 8550:2015.

Умовну в'язкість визначали методом визначення часу (секунд) необхідного для 100 мл продукту з піпетки діаметром вихідного отвору 5,0 мм при температурі 20 °С.

Мікробіологічні показники визначали відповідно ДСТУ 7357:2013, ДСТУ 7999:2015, ДСТУ 8446:2015, ДСТУ 8447:2015.

Органолептичні показники зразків йогуртів визначали згідно ДСТУ 4343:2004, з рекомендаціями описаними в міжнародному стандарті ISO 22935-2:2023. Сенсорно-профільним методом за оцінювали зовнішній вигляд, консистенцію, смак, запах, колір.

Біологічну цінність продуктів відображали розрахунком вмісту вітамінів, макро- і мікроелементів.

Математично-статистична обробка одержаних результатів здійснена на ЕОМ з використанням програмного забезпечення MS Excel 2016. Визначена величина достовірності відхилення (p) не перевищує 0,05, що свідчить про значення показника точності (P) результатів більше 0,95.

Результати досліджень. На першому етапі визначали вплив наповнювача на органолептичні показники дослідних зразків йогуртів. Зовнішній вигляд свіже-приготовлених зразків йогуртів та результати сенсорно-профільного аналізу представлено на рис. 1 і 2.

Узагальнені результати сенсорно-профільного аналізу зразків показують, що всі дослідні зразки йогуртів відповідають вимогам стандарту. В дослідних зразках смак, запах і колір йогурту залежить від кількості доданого наповнювача – при збільшенні відповідно стає більш інтенсивним. Найбільш привабливим і гармонійним для експертної комісії є зразок № 2 із вмістом пюре кропива-яблука 18 %. При цьому йогурт характеризується кремово-зеленим кольором з частками внесеного наповнювача, з легким ароматом та приємним присмаком кропива та нотками яблука.

На другому етапі визначено вплив наповнювача на основні фізико-хімічні (в'язкість, вміст сухих речовин,



а

б



в

г

Рис. 1. Зовнішній вигляд дослідних зразків йогуртів:
а – контрольний зразок; б – зразок № 1; в – зразок № 2;
г – зразок № 3

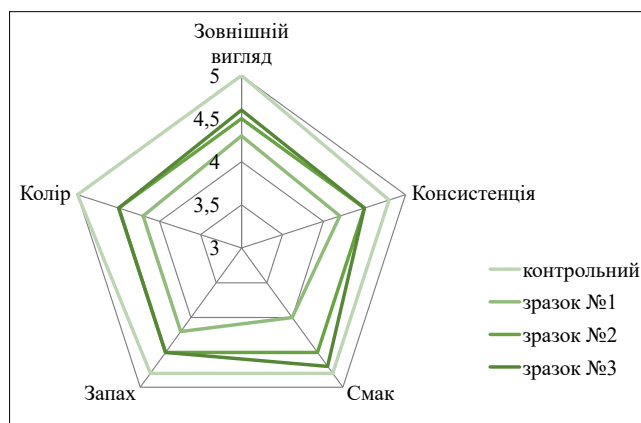


Рис. 2. Сенсорний профіль дослідних зразків йогуртів

кислотність) та мікробіологічні показники йогуртів із додаванням пюре кропива-яблука. Результати представлено в табл. 2.

Таблиця 2

Якісні показники дослідних зразків йогуртів

Показник	Значення			
	Контрольний зразок	Зразок № 1	Зразок № 2	Зразок № 3
Фізико-хімічні показники				
Кислотність, од. рН	4,27	4,77	4,62	4,29
Умовна в'язкість, с	17,0	39,0	31,0	30,6
Вміст сухих речовин, %	10,78	12,76	12,48	12,44
Мікробіологічні показники				
Кількість мікроорганізмів, КУО/см ³	$8,1 \cdot 10^8$	$1,2 \cdot 10^8$	$2,5 \cdot 10^8$	$4,5 \cdot 10^8$
БГКП, КУО/1 см ³	не виявлено			
Дріжджі та пліснява, КУО/см ³	0	≤30	≤28	≤15

Результати фізико-хімічних та мікробіологічних досліджень показують, що виготовлені зразки йогуртів не перевищують допустимих значень відповідно норм ДСТУ 4343:2004.

На заключному етапі дослідження досліджено зміни якісних показників (органолептичні показники, кислотність, мікробіологічні показники) в процесі зберігання (33 доби).

Сенсорним аналізом було встановлено, що в процесі зберігання всі зразки йогуртів мали стабільні органолептичні показники протягом 15 днів зберігання. Починаючи з 18 доби візуально помітно стало відокремлення сироватки на поверхні, що є допустимим відповідно стандартів. З 21 доби зберігання в дескрипторах смаку і запаху почали переважати кислomолочні ноти на заміні солодких яблучно-трав'яних.

Динаміка зміни кислотності та кількості молочнокислих мікроорганізмів в процесі зберігання представлено на рис. 3–4.

Результати зміни кислотності і кількості мікроорганізмів в йогуртах в процесі зберігання показали, що всі зразки мають плавну тенденцію до зниження показників, однак в межах норми протягом 33 днів зберігання.

Обговорення. В роботі розглянуто вплив пюре кропиви-яблука на якісні показники йогурту. Результати

органолептичного аналізу (рис. 2) показали, що кількість внесеного наповнювача суттєво впливає на загальну оцінку експертної комісії. Так при максимальній кількості наповнювача 20 % (в якій частка кропиви складає 5 %) йогурт характеризується дещо неоднорідною консистенцією з видимим внесеним наповнювачем зеленого кольору, смак і аромат яскраво виражений кропиви. При зменшенні дози внесення кропиви відповідно виражений смак і аромат зникає, стає більш гармонійним як і колір.

Результати органолептичного аналізу отриманих зразків йогуртів узгоджуються з даними науковців (Nettega et al., 2023), які доводять, що відсоток внесеного наповнювача в рецептуру йогурту як позитивно так і негативно впливає на споживчі властивості готового продукту.

Внесення наповнювача пюре кропиви-яблука має помітний вплив на фізико-хімічні показники, зокрема на вміст сухих речовин, що пояснюється із більшим вмістом сухих речовин в наповнювачі. Також помітна різниця в показниках активної кислотності, що пояснюється активністю розмноження молочнокислої мікрофлори в контрольному зразку і зразках із меншим вмістом наповнювача. Пюре кропиви-яблука пригнічує ріст мікрофлори, що підтверджують результати визначення загальної кількості молочнокислих мікроорганізмів. Ці результати підтверджуються результатами науковців (Ratsuk et al., 2023),

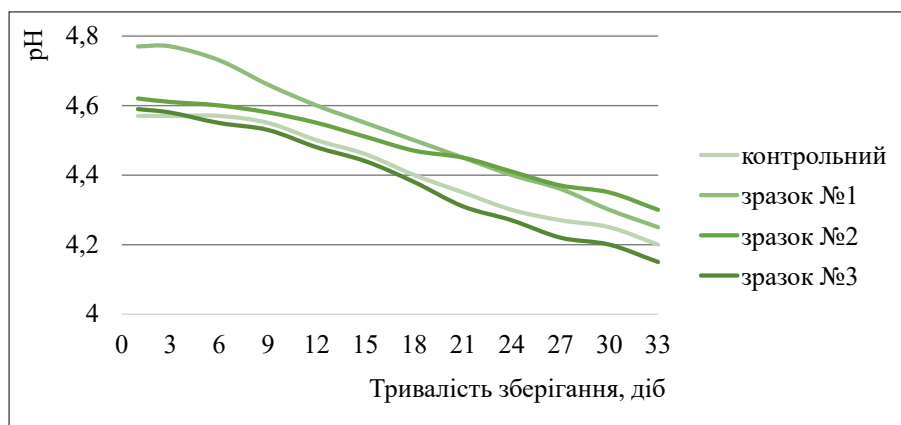


Рис. 3. Динаміка зміни кислотності в зразках йогуртів у процесі зберігання

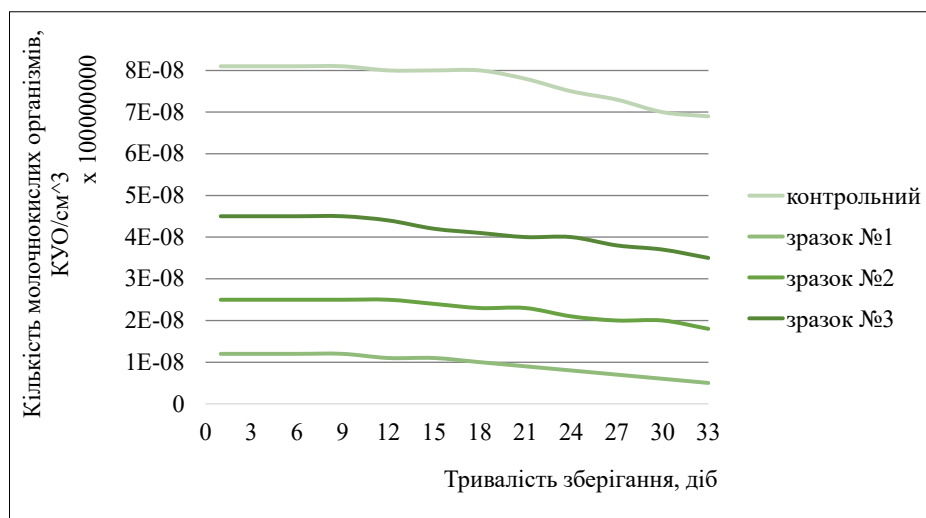


Рис. 4. Динаміка зміни кількості молочнокислих мікроорганізмів у зразках йогуртів у процесі зберігання

якими обґрунтовано, що збільшення кількості введених до складу йогурту смако-ароматичних речовин негативно відбивається на кількості «живої» мікрофлори.

Проведені дослідження показують, що підготовлені зразки йогуртів володіють відмінними сенсорними, фізико-хімічними та мікробіологічними показниками, які залишаються стабільними при зберіганні протягом 21 доби.

Висновки. Згідно результатів досліджень визначено вплив пюре кропиви-яблука на якісні показники йогурту.

В результатів проведених досліджень рекомендовано співвідношення пюре кропиви-яблука як 1:5, а кількість наповнювача в рецептурі йогурту – 18 %. При цьому йогурт характеризується кремово-зеленим кольором з частками внесеного наповнювача, з легким ароматом та приємним присмаком кропиви та нотками яблука. Дослідний зразок має відмінні фізико-хімічні та мікробіологічні показники, які залишаються стабільними при зберіганні.

Бібліографічні посилання:

1. Abdel-Hamid, M., Romeih, E., Huang, Z., Enomoto, T., Huang, L., & Li, L. (2020). Bioactive properties of probiotic set-yogurt supplemented with *Siraitia grosvenorii* fruit extract. *Food chemistry*, 303, 125400. doi: 10.1016/j.foodchem.2019.125400
2. Abdullah, R., Arshad, H., Kaleem, A., Iqtadar, M., Aftab, M., & Saleem, F. (2023). Assessment of angiotensin converting enzyme inhibitory activity and quality attributes of yoghurt enriched with *Cinnamomum verum*, *Elettaria cardamomum*, *Beta vulgaris* and *Brassica oleracea*. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 30 (2), 103556. doi: 10.1016/j.sjbs. 2023.103556
3. Adriana, D., Georgiana, G. C., Sorina, R., Anca-Mihaela, G., & Lăcrămioara, R. (2018). Assessment of the Antioxidant Activity and Quality Attributes of Yogurt Enhanced with Wild Herbs Extracts. *Journal of Food Quality*, 18, 5329386. doi: 10.1155/2018/5329386
4. Bajaj-Zhezherun S., & Ilyuk D. (2022). Kharchova tsinnist kropvy dvodomnoi (*Urtica Diodica* L.), yak syrovyny dlia vyrobnytstva ozdorovchyykh produktiv. [Nutritional value of stinging nettle (*Urtica Diodica* L.) as a raw material for the production of health products]. Scientific achievements of youth – solving the problems of human nutrition in the 21st century: materials of the 88th International scientific conference of young scientists, graduate students and students (April–May 2022, Kyiv: NUHT), 1, 41. (in Ukrainian).
5. Goyko, I. Yu., & Stetsenko, N. O. (2022). Doslidzhennia vplyvu fitokompozytsii antyoksydantnoi dii na kompleksnu otsinku yakosti yohurtu [Study of the effect of phytocomposition of antioxidant action on comprehensive assessment of yogurt quality]. *Scientific works of the National Technical University of Ukraine*, 28 (2), 163–172. (in Ukrainian).
6. Herrera, T., Iriando-DeHond, M., Ramos Sanz, A., Bautista, A. I., & Miguel, E. (2023). Effect of Wild Strawberry Tree and Hawthorn Extracts Fortification on Functional, Physicochemical, Microbiological, and Sensory Properties of Yogurt. *Foods*, 12 (18), 3332. doi: 10.3390/foods12183332
7. Kulaitienė, J., Vaitkevičienė, N., & Levickienė, D. (2021). Studies on Proximate Composition, Mineral and Total Phenolic Content of Yogurt Bites Enriched with Different Plant Raw Material. *Fermentation*, 7, 301. doi: 10.3390/fermentation7040301
8. Najgebauer-Lejko D., Liszka K., Tabaszewska M., & Domagała, J. (2021). Probiotic Yoghurts with Sea Buckthorn, Elderberry, and Sloe Fruit Purees. *Molecules*, 26, 2345. doi: 10.3390/molecules26082345
9. Ratsuk, M., Yurova, T., & Kazmyrchuk, O. (2023). Otsiniuvannia yakosti ta bezpechnosti yohurtiv z kharchovymy voloknamy [Evaluation of the quality and safety of yogurts with dietary fibers]. *Bulletin of the Kherson National Technical University*, 1 (84), 107–111. doi: 10.35546/kntu2078-4481.2023.1.13 (in Ukrainian).
10. Samilyk, M., & Demidova, E. (2022). Use of Non-traditional Raw Materials in Yogurt Production Technology. *Restaurant and Hotel Consulting. Innovations*, 5 (2), 281–291. doi: 10.31866/2616-7468.5.2.2022.270113

Sylenko T. P., PhD, Sumy National Agrarian University, Sumy, Ukraine

Dziuba Ya. S., student, Sumy National Agrarian University, Sumy, Ukraine

Bolgova N. V., PhD, Sumy National Agrarian University, Sumy, Ukraine

Nazarenko Yu. V., PhD, Sumy National Agrarian University, Sumy, Ukraine

Puryhin I. O., Postgraduate, Sumy National Agrarian University, Sumy, Ukraine

Odintsov S. M., Postgraduate, Sumy National Agrarian University, Sumy, Ukraine

Determination of the influence of nettle-apple pure on quality indicators of yogurt

Yogurt is the most popular fermented milk product on the consumer market. It normalizes the work of the intestines, significantly improves digestion and facilitates the assimilation of nutrients. The use of plant powders and extracts to enrich yogurt with vitamins, minerals and phenolic compounds, which enhance its functional and antioxidant properties, is becoming more and more relevant. The use of compositions of plant origin has the potential to increase and enrich the assortment of fermented milk products with antioxidant properties. The aim of the work is to determine the influence of nettle-apple puree on the quality indicators of yogurt. This will make it possible to develop yogurt technology and expand the range of fermented milk products with increased biological value. Cow's milk was used as the main raw material, which meets the requirements of DSTU 3662:2018. Pasteurized nettle and apple puree was used as a filler in a ratio of 1:3, 1:5, and 1:15. The filler content (nettle-apple puree) was varied in the recipe of yogurts from 16 % to 20 %. In order to determine the optimal amount of filler, a study of the quality indicators of the studied samples was performed. Standard research methods were used in the work. As a result of the organoleptic evaluation, it was determined that the most attractive and harmonious is sample No. 2 with a nettle-apple puree content of 18 %. At the same time, the yogurt is characterized by a creamy-green color with particles of added filler, with a light aroma and a pleasant taste of nettle and hints of apple. The results of physico-chemical and microbiological studies show that the manufactured yogurt samples do not exceed the permissible values according to the standards of DSTU 4343:2004. The results of changes in acidity and the number of microorganisms in yogurts during storage showed that all samples have a smooth tendency to decrease indicators, but within the normal range during 33 days of storage. As a result of the research, the nettle-apple puree ratio is recommended as 1:5, and the amount of filler in the yogurt recipe is 18 %.

Key words: dairy products, yogurt, vegetable raw materials, nettle, fiber, biological value.

ПРОБЛЕМИ І ПЕРСПЕКТИВИ ВИРІШЕННЯ ПИТАНЬ ПІДВИЩЕННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ ДЕТАЛЕЙ МАШИН, ЯКІ ПРАЦЮЮТЬ В УМОВАХ ГІДРОАБРАЗИВНОГО ЗНОШУВАННЯ

Тарельник Наталія В'ячеславівна

кандидат економічних наук, доцент

Сумський національний аграрний університет, м. Суми, Україна

ORCID: 0000-0002-6304-6925

natasha-tarelnik@ukr.net

Гапонова Оксана Петрівна

доктор технічних наук, професор

Сумський державний університет, м. Суми, Україна

ORCID: 0000-0002-4866-0599

gaponova@pmtkm.sumdu.edu.ua

Майфат Микола Миколайович

PhD студент

Сумський національний аграрний університет, м. Суми, Україна

ORCID: 0009-0004-0563-929X

mayfat_snau@ukr.net

Василенко Максим Юрійович

PhD студент

Сумський національний аграрний університет, м. Суми, Україна

ORCID: 0009-0000-3115-2072

Vasylenkomaksymnl@gmail.com

Гейко Тарас Олександрович

студент

Сумський національний аграрний університет, м. Суми, Україна

ORCID: 0009-0009-7268-5823

taras.garndga@gmail.com

В статті зосереджено увагу на великій кількості машин що працюють в різних галузях (газо-нафтовій, гірничодобувній, хімічній, сільськогосподарській, транспортній тощо) промисловості України і інших господарств, які підлягають негативному впливу гідроабразивного зношування (ГЗ). Це гідравлічні машини (ГМ), серед яких найбільш розповсюдженими є насоси і гідродвигуни, а також центрифуги, для очищення стічних вод, сепаратори, арматура тощо. Від негативного впливу ГЗ залежить безпека, продуктивність, мобільність та ефективність бурових установок, конструктивних елементів бурових колон, застосування гравійних фільтрів для запобігання надходженню піску із пласта в свердловину, виникнення аварійних ситуацій пов'язаних з руйнуванням поверхневих шарів деталей і вузлів. Деталі машин, поверхні яких контактують з потоками рідини і працюють в важких умовах оточуючих середовищ, підлягають зношенню, яке залежить від: виду тертя, механічних і фізико-хімічних властивостей матеріалу, швидкості відносного переміщення контактуючих поверхонь, величиною і характером навантаження, видом і якістю мастил, умовами експлуатації тощо. Розрізняють декілька видів зношування: корозія, ерозія, гідроабразивне зношення, кавітація, біологічне пошкодження.

Для захисту поверхонь сталевих і чавунних деталей від зносу, крім зміцнення поверхневих шарів, серед яких особливе місце займає хіміко-термічна обробка, використовують технології нанесення захисних покриттів: напильовання і наплавлення твердими зносостійкими матеріалами, лазерну обробку шлікерних покриттів, гальваніку, які є шкідливими для здоров'я людини і небезпечними для оточуючого середовища. Серед ефективних, енергоощадних і екологічно безпечних технологій нанесення захисних покриттів, особливе місце займає електроіскрове легування (ЕІЛ), яке в комбінації з поверхневим пластичним деформуванням (ППД) і нанесенням металопластичних матеріалів (МППМ), армованих порошками твердих зносостійких матеріалів (карбід вольфраму і нітрид цирконію) може забезпечити захист деталей від гідроабразивного і інших видів зносу.

Ключові слова: електроіскрове легування, високоміцний чавун, сталь, деталь, гідроабразивний знос, покриття, поверхнєве пластичне деформування, металополімерний матеріал.

DOI <https://doi.org/10.32782/msnau.2023.4.8>

Вступ. Серед усіх машин і пристроїв, що працюють в різних галузях (газо-нафтовій, гірничодобувній, хімічній, сільськогосподарській, транспортній тощо) промисловості

України і інших господарств, дуже велика кількість підлягає негативному впливу гідроабразивного зношування (ГЗ). Це, в першу чергу гідравлічні машини (ГМ), серед

яких найбільш розповсюдженими є насоси і гідродвигуни, а також центрифуги, для очищення стічних вод, сепаратори, арматура і таке інше.

Від негативного впливу ГЗ залежить безпека, продуктивність, мобільність та ефективність бурових установок (Mironov Yu. V. et al., 2014), руйнування конструктивних елементів бурильних колон (Lyskanych M. V. et al., 2012), належне застосування гравійних фільтрів для запобігання надходженню піску із пласта в свердловину (Kondrat R. M. & Dremliukh N. S., 2016), виникнення аварійних ситуацій пов'язаних з руйнуванням замкових різьбових з'єднань (Mirnenko V. I. et al., 2017).

Спрацювання деталей вище означеного обладнання, як правило, відбувається в наслідок мікроударного навантаження на їх поверхневі шари. Нерідко мікроударний вплив твердих часок в потоці посилюється присутністю хімічно активної рідини. За таких умов традиційні конструкційні матеріали не завжди задовольняють потрібним вимогам щодо надійності та довговічності.

Останнім часом все більшу увагу фахівців привертає дослідження та використання нових зносостійких матеріалів (полімерних, конструкційних, композиційних) тощо (Lytvynenko O.A. et al., 2010). Роботи направлені на підвищення надійності і довговічності деталей машин, працюючих в умовах гідроабразивного і інших видів зношування актуальні і своєчасні.

Аналіз сучасних закордонних і вітчизняних досліджень і публікацій. Як було показано вище, деталі ГМ, насосів і гідродвигунів, а також центрифуг, сепараторів, арматури тощо працюють в умовах кавітаційно-ерозійного та гідроабразивного зношування, а надійність і довговічність їх роботи визначається можливістю чинити опір спрацюванню. Спрацювання поверхневих шарів деталей в наслідку дії твердих часток, що знаходяться в потоковій рідині називають ГЗ, а в результаті зношування поверхні тіла під дією потоку рідини – гідроерозійним.

Як показують статистичні дослідження, у 85–90 % випадків причиною виходу з ладу гідроагрегатів є знос вузлів та деталей; на подолання тертя витрачається близько 30–40 % виробленої енергії (Shymchuk S.P., 2008). В (Mozghovyi O. et al., 2019) стверджується, що основною причиною зниження експлуатаційних характеристик і ресурсу шестеренних насосів є зношування його деталей, а відмови насосів складають 67–75 % (Posviatenko E.K. et al., 2017).

Співробітники лабораторії експлуатації насосних станцій Андижанського інституту сільського господарства та Агротехнології для вирішення проблеми підвищення ККД відцентрових і осевих насосів при перекачуванні води з високим вмістом осаду, запропонували спосіб нанесення полімерного покриття на металеві поверхні лопатей, шляхом нанесення на їх поверхню епоксидної смоли ЕД-6 з різними наповнювачами. Було встановлено, що найкраще зчеплення полімерного покриття досягається при температурі металу 21 °С (Ulugojaev K. Kh., 1989).

Найвищу зносостійкість мають полімерні матеріали на основі епоксидної смоли з карбідом кремнію, при

цьому силумін (матеріал насосу) демонструє низьку зносостійкість. При випробуванні ґрунтових насосів виявилось, що деталі, виготовлені з електрокорунду на епоксидно-фенол-формальдегідній зв'язці в порівнянні з деталями із зносостійкого чавуну збільшує термін служби насосів у 3-8 разів (Leonidov L. D. J., 1987).

Слід відмітити, що використання зносостійких полімерних матеріалів для виготовлення та покриття деталей насосів не знайшло широкого застосування в практиці з таких причин (Mamazhonov M. et al., 2022): 1) полімерні композиції не забезпечують задовільної зносостійкості при високих витратах; 2) шорстка поверхня полімерних покриттів створює додаткові гідравлічні опори і погіршує гідравлічний ККД; 3) якість полімерних покриттів сильно залежить від чіткого дотримання умов застосування технології.

У (Niță A. et al., 2023) автори встановлювали кореляцію між хімічним складом матеріалів лопатей змішувачів що використовуються у виробництві цементного бетону і працюють в особливих умовах, таких як механічні навантаження, явища абразивно-ерозійного тертя, корозійне робоче середовище та їх поведінкою в процесі зношування. Новизна дослідження полягає в експериментальній програмі з використанням найпоширеніших чавунів, що використовуються в промисловості. Автори проводили прискорені випробування в лабораторних умовах з метою дослідження інтенсивності явища зношування змішувальних лопатей в абразивному/ерозійному середовищі. Для промислових застосувань, специфічних для виробництва цементного бетону, рекомендовано використання чавуну з 25 % Cr або 4 % Cr. Вибір проміжного класу (9 % Cr) не є виправданим, оскільки він має вищу ціну та нижчу продуктивність, ніж клас 4 % Cr.

Абразивне зношування створює значні проблеми для промисловості бетономішалок, оскільки відбувається як у сухих, так і вологих умовах. Елементи, що обертаються, зазвичай виготовляються зі сталі, а стійкість до стирання сталі визначає термін служби та масу барабана. У роботі (Jungedal M., 2012) автором розроблено експериментальний стенд для перевірки відносної зносостійкості різних видів сталі в умовах, що імітують бетономішувачі. Випробування використовували подрібнений граніт товщиною 16–25 мм і зосереджувались на зносі від ковзання та ударному зносі для 30 різних типів сталі. Усі марки сталі були проаналізовані щодо профілю твердості, мікроструктури та хімічного складу перед випробуванням. Втрати від зносу досліджували шляхом зважування до, під час і після випробувань. Встановлено залежність між твердістю та зносостійкістю на певному рівні твердості. Вища твердість показує кращу зносостійкість для цього типу застосування. Було виявлено, що форма та деградація абразивів впливають на швидкість зношування.

Таким чином, деталі машин, поверхні яких контактують з потоками рідини і працюють в важких умовах оточуючих середовищ підлягають зношенню, яке залежить від: виду тертя, механічних і фізико-хімічних властивостей матеріалу, швидкості відносного переміщення контактуючих поверхонь, величиною і характером навантаження, видом і якістю мастил, умовами експлуатації тощо. Розрізняють декілька видів зношування: *корозія*,

ерозія, гідроабразивне зношення, кавітація, біологічне пошкодження. Для виготовлення деталей, стійких проти гідроабразивного і інших видів зношування в залежності від оточуючого середовища використовують корозійностійкі сталі, високоміцні і хромисті чавуни.

В залежності від особливостей в яких протікає процес тертя розрізняють декілька видів зношування. Це: *корозія, ерозія, кавітація, біологічне пошкодження* (рис. 1) (Herman V.F., 2014).

В цей час для конструкторів і технологів є велика кількість технологій, призначених для надання поверхневому шару деталі необхідних фізичних, хімічних, трибологічних та експлуатаційних властивостей. Так для захисту поверхонь деталей від різних видів зношування та негативного впливу навколишнього середовища їх піддають зміцненню. Це: різні способи напilenня металокерамічних покриттів (Shatskyi I.P. et al., 2020; Storozhenko M.S., 2017; Umanskyi O. et al., 2020), наплавлені покриття з композиційних матеріалів (Bembenek M. et al., 2022; Trembach B.O. et al., 2022), відцентрове армування поверхневих шарів стали частинками карбиду вольфраму (Ropyak L., et al., 2016), покриття з шарами оксиду алюмінію (Ivasenko I. et al., 2020; Bembenek M. et al., 2022; Student M.M. et al., 2017). Особливе місце серед технологій, що підвищують показники якості поверхонь деталей, займає хіміко-термічна обробка (ХТО), яка поєднує в собі цементацію, азотування, нітроцементацію та ряд інших методів (F.A. P. Fernandes et al., 2010; Shu-Hung Yeh et al., 2011; S. Ben Slima, 2012).

Висвітлення не вирішених раніше частин загальної проблеми. Слід відмітити, що переважна більшість методів зміцнення і відновлювання поверхневих шарів, які під час роботи піддаються зношуванню відбуваються негативними екологічно небезпечними методами, шкідливими, як для людей, так і для оточуючого середовища. Це різні способи наплавлення, наварювання, напilenня, гальваніка також деякі методи ХТО і термічної обробки. Згідно (Sarzhonov B. O., 2021) термічна і ХТО деталей відносяться до найбільш поширених факторів ризику.

Серед розглянутих методів зміцнення і відновлення деталей великої уваги заслуговує електроіскрове легування (ЕІЛ), яке є екологічно безпечним й останнім часом все частіше використовують, як при виготовленні деталей, так і в ремонтному виробництві (Tarelnyk, V.B. et al., 2017). Метод ЕІЛ має ряд специфічних

особливостей: матеріал анода (легуючого електрода) може утворювати на поверхні катода (деталі) шар покриття, надзвичайно міцно зчеплений з поверхнею. У цьому випадку не тільки відсутня межа поділу між нанесеним матеріалом і металом основи, але й відбувається дифузія елементів анода в катод (Tarelnyk V.B. et al., 2022); легування можна здійснювати у зазначених місцях, не захищаючи при цьому решту поверхні деталі; технологія ЕІЛ металевих поверхонь дуже проста, а необхідна апаратура компактна і транспортабельна.

В (Tarelnyk V.B. et al., 2021) представлені результати порівняльних досліджень впливу зварювальних робіт і методу ЕІЛ на зміни в складі повітря, які показали, що в зоні проведення наплавлення на сталь 12Х18Н10Т зносостійкого покриття електродом марки ОК61.30 $\varnothing 2,5$ мм з'являється велика кількість вуглекислого газу CO_2 і утворюються нестабільні іони NO, тобто виникають гази, які є отруйними навіть в малих концентраціях. Слідів озону O_3 за допомогою мас-спектрометра не виявлено.

При дослідженні хімічного складу газового середовища в зоні проведення робіт при ЕІЛ сталі 12Х18Н10Т електродом-інструментом (ЕІ) з твердого сплаву Т15К6 з енергією розряду 3,4 Дж встановлено, що мас-спектр газового середовища практично ідентичний мас-спектру чистого повітря. Незначні відмінності спостерігаються тільки в кількості водяної пари, що пов'язано, швидше за все, з різною вологістю повітря.

Таким чином, для захисту деталей від інтенсивного зношування бажано використовувати технологію ЕІЛ, яка володіє більшістю переваг існуючих методів, а по багатьом (екологічна безпека, локальність зміцнення, нанесення покриття з любого струмопровідного матеріалу, міцний зв'язок з основою тощо) перевищує їх.

Метою роботи є забезпечення захисту деталей машин від гідроабразивного і інших видів зношування, шляхом аналізу існуючого накопиченого опиту в цій галузі і на його підставі розробки ефективної, енергоощадної і екологічно безпечної технології.

Висвітлення основного матеріалу дослідження. На сьогодні, в різних галузях виготовляється, відновлюється і зміцнюється дуже велика кількість деталей з чавунів. В порівнянні зі сталями у чавунів нижчі механічні властивості, але суттєво кращі технологічні: зносостійкість, антифрикційність, оброблюваність різанням, тощо. Серед чавунів, особливу нішу займають високоміцні чавуни (ВЧ) з кулястим графітом, які завдяки



Рис. 1. Корозійне руйнування поверхні робочого колеса турбіни (а), кавітаційне знищення напрямного апарату насоса (б), пліснява на моторі-редукторі очисника фар автомобіля (в) дії молюсків на занурені у воду деталі машин (г) (Herman V. F., 2014)

оптимальному поєднанню ливарних, фізико-механічних і експлуатаційних властивостей та економічності їх виробництва, широко застосовуються в сучасному машинобудуванні (DSTU 3925-99, 2000). Завдяки їх механічним характеристикам ($\sigma_{0.2}=370\ldots 700$ МПа, $\delta = 2\ldots 7$ %, твердість за шкалою Брінелля 153...360 НВ) ВЧ використовують замість сталі, сірого і ковкого чавунів та деяких кольорових сплавів (Movchan V.P. & Berezhnyi M.M., 2001). З ВЧ на перлітній основі, марок ВЧ 500, ВЧ 600, ВЧ 700, ВЧ 800, ВЧ1000, виготовляють поршневі кільця, гільзи, шестерні, деталі двигунів, насосів, виливниці, прокатні валки, тощо (Ukrainska..., 1985).

Аналіз літературних і патентних джерел показує, що існує велика кількість робіт, направлених на покращення параметрів якості поверхневих шарів деталей з чавунів. При цьому дослідниками використовуються різні технології: плазмове поверхнєве модифікування (Samotugina Yu.S. et al., 2021), нанесення у вигляді шлікера сумішей різного складу з подальшим висушуванням і нагріванням плазмотроном (Shylyna O.P., 2017) фрикційною обробкою (Hurei T.A., 2016), введенням домішок модифікаторів (Skoblo T.S. et al., 2019), підігріванням перед заливанням форми (Sposib..., 2016) тощо.

В (Ivankova O.V. et al., 2020) авторами був проведений аналіз технологій, за допомогою яких можливо відновлювати зношені поверхні сталей і чавунних деталей. При цьому перевага віддавалась методам, які базуються на технологіях, що базуються на використанні висококонцентрованих джерел енергії: електролітичний метод (Karakurkchi A.V., 2015; Yar-Mukhamedova G.S. et al., 2017), газотермічне напilenня (Student M.M. et al., 2017; Gvozdecki V.M., 2018), лазерної обробки (Lyashenko B.A. et al., 2010; Skoblo T.S. et al., 2019; Carcel B. et al., 2011; Guzanova A. et al., 2020) та ЕІЛ. В результаті аналізу розглянутих технологій перевага була віддана методу ЕІЛ, особливостями якого є: можливість використання в якості матеріалу, що наноситься, чистих металів, сплавів, сталей різного ступеню легування, металокерамічних матеріалів, графіту тощо, міцний зв'язок нанесеного металу з основою, локальність процесу, низька енергоємність та екологічна безпека тощо (Tarel'nyk V.B. et al., 2021). При застосуванні методу ЕІЛ, автори (Ivankova O.V. et al., 2020) рекомендують використовувати в якості ЕІ прутки з ніхрому Х20Н80.

Крім значних переваг, метод ЕІЛ має і недоліки: обмеження товщини і нерівномірність нанесеного шару, підвищення шорсткості поверхні, зниження утомної міцності (Tarel'nyk V.B. et al., 2021). Недоліки ЕІЛ усуваються за рахунок об'єднання з іншими екологічно безпечними, мало затратними і ефективними технологіями: поверхневим пластичним деформуванням (ППД), в якості якого останнім часом все більше використовують метод безабразивної фінішної обробки (БУФО) (Tarel'nyk V.B. et al., 2019) і нанесення металополімерних матеріалів (МПМ) (Tarel'nyk V.B. et al., 2021; Tarel'nyk V.B. et al., 2020).

Для захисту проти гідроабразивного зносу, як чавунних, так і сталейних деталей, перспективними можуть бути покриття нанесені методом ЕІЛ коли в якості ЕІ використовують матеріали, що складаються з тонкодисперсної

суміші 1М (70 % Ni, 20 % Cr, 5 % Si, 5 % B) та ВК6. Ці матеріали раніше наносили на поверхні деталей шлікерним методом з наступним відпалом у вакуумі (Tarel'nyk V.B. et al., 2023). Покриття складу 90 % ВК6 + 10 % 1М нанесені електродами-інструментами, виготовленими методом порошкової металургії (ПМ), дозволяють формувати поверхневий шар на сталевих поверхнях з мікротвердістю до 14200 МПа (Tarel'nik V.B. et al., 2017; Tarel'nyk V.B. et al., 2019).

Незважаючи на те, що технологія ЕІЛ, з використанням ЕІ з матеріалів складу 1М і 90 % ВК6 + 10%1М, за рахунок кращого щеплення нанесеного матеріалу з основою, значно краща від нанесення їх шлікерним методом, але процедура їх виготовлення методом ПМ дуже складна, енергоємна, довготривала і досить вартісна.

В останні декілька років стали з'являтися статті, в яких з метою удосконалення методу ЕІЛ додаткове легування поверхневого шару корисними елементами відбувається за рахунок спеціальних технологічних насичуючих середовищ (СТНС), які попередньо наносяться на поверхню, що легується, у вигляді паст чи суспензій (Tarel'nyk V. et al. New method for..., 2017; Tarel'nyk V. et al. New sulphiding ..., 2017). На наш погляд, технологію нанесення зносостійких покриттів методом ЕІЛ, з використанням ЕІ складу 1М і 90 % ВК6+10 % 1М, що виготовляють шляхом ПМ, можна удосконалити за рахунок використання СТНС.

Для покращення якості сформованих методом ЕІЛ покриттів (зниження шорсткості і підвищення суцільності) на їх поверхню, ретельно втираючи наносять МПМ, які з метою підвищення мікротвердості можна армувати порошками карбиду вольфраму, нітриду цирконію або їх сумішшю, які характеризуються високою твердістю та міцністю. Крім цього нітрид цирконію використовують для захисних зносостійких покриттів виробів, які працюють в агресивних середовищах. Також нітрид цирконію, серед інших мононітридів перехідних металів має найкращу корозійну стійкість (Koutsokeras L.E. & Abadias G., 2012; Chiou S. Y. & Bing H., 1998; Beniaa H.M. et al., 2003).

Найближчим аналогом запропонованої технології, є спосіб формування покриття на поверхнях сталейних деталей, який виконують наступним чином. Перед нанесенням комбінованого електроіскрового покриття поверхню деталі шліфують до Ra = 0,5 мкм. Потім проводять цементацію шліфованої поверхні деталі методом ЕІЛ (ЦЕІЛ). Після виконують алітування цементованого шару алюмінієвим ЕІ з подальшим нанесенням на нього електроіскрового покриття ЕІ з твердого сплаву Т15К6. Далі поверхню сформованого КЕП піддають ППД методом обкатки кулькою. Після полімеризації МПМ, армованого порошком твердосплавної суміші ВК6, частину шару металополімерного матеріалу видаляють до виступів шорсткості покриття з твердого сплаву Т15К6 (Tarel'nyk V. et al., 2020).

Недоліками даного способу є: дуже складна технологія формування покриття; висока вартість використання технології; спосіб придатний тільки для деталей тіл обертання; недостатній захист сталевих поверхонь від ГЗ.

Отже, виникає як науковий, так і практичний інтерес провести порівняльні дослідження зносостійкості покриттів, складу (90 %ВК6+10%1М), сформованих на сталевих і чавунних поверхнях, як електродами-інструментами, виготовленими методом порошкової металургії, так і нанесеними методом ЕІЛ з використанням СТНС. При цьому на поверхневий шар покриттів, нанесених різними способами, з метою зниження шорсткості поверхні і підвищення їх суцільності, потрібно наносити МПМ, армовані порошками WC, ZnN або їх сумішшю. На наш погляд, цей спосіб міг би підвищити здатність поверхневого шару деталей чинити опір зношуванню, гарантував би надійність і довговічність їх роботи в агресивних середовищах, був би екологічно безпечним і скоротив витрати на його здійснення.

Висновки:

1. Деталі машин, поверхні яких контактують з потоками рідини і працюють в важких умовах оточуючих середовищ, підлягають зношенню, яке залежить від: виду тертя, механічних і фізико-хімічних властивостей матеріалу, швидкості відносного переміщення контактуючих поверхонь, величиною і характером навантаження, видом і якістю мастил, умовами експлуатації тощо. Розрізняють декілька видів зношування: корозія, ерозія, гідроабразивне зношення, кавітація, біологічне пошкодження.

2. Для виготовлення деталей, стійких проти гідроабразивного і інших видів зношування в залежності від оточуючого середовища використовують вуглецеві сталі, нержавіючі корозійностійкі сталі, високоміцні і хромисті чавуни.

3. Для захисту поверхонь деталей від зносу, крім зміцнення поверхневих шарів, серед яких особливе місце займає ХТО, використовують нанесення захисних покриттів: напилювання і наплавлення твердими зносостійкими матеріалами, лазерну обробку шлікерних покриттів, які є шкідливими для здоров'я людини і небезпечними для оточуючого середовища.

4. Серед ефективних, енергоощадних і екологічно безпечних технологій нанесення захисних покриттів, особливе місце займає ЕІЛ, яке в комбінації з ППД і нанесенням МПМ, армованих порошками твердих зносостійких матеріалів (карбід вольфраму і нітрид цирконію) може забезпечити захист деталей від гідроабразивного і інших видів зносу.

5. Альтернативою технології нанесення методом ЕІЛ захисних покриттів електродами-інструментами складу 90 %ВК6+10%1М, виготовленими методом порошкової металургії, може бути більш технологічна і дешевша технологія використання ЕІЛ з застосуванням спеціальних технологічних насичуючих середовищ.

Бібліографічні посилання:

1. Bembenek M., Makoviichuk M., Shatskyi I., Ropyak L., Pritula I., Gryn L. and Belyakovskiy V. (2022). Optical and Mechanical Properties of Layered Infrared Interference Filters. *Sensors*, 22, No. 21: 8105; <https://doi.org/10.3390/s22218105>
2. Bembenek M., Prysyazhnyuk P., Shihab T., Machnik R., Ivanov O., and Ropyak L. (2022). Microstructure and Wear Characterization of the Fe-Mo-B-C-Based Hardfacing Alloys Deposited by Flux-Cored Arc Welding. *Materials*, 15, No. 14: 5074; <https://doi.org/10.3390/ma15145074>
3. Beniaa H.M., Guemmaza M., Schmerberb G., Mosserb A., Parlebas J.C. (2003). Optical properties of non-stoichiometric sputtered zirconium nitride films. *Applied Science*. Vol. 211. P. 146-155.
4. Carcel B., Sampedro J., Ruescas A., & Toneu X. (2011). Corrosion and wear resistance improvement of magnesium alloys by laser cladding with Al-Si. *Physics Procedia*, 12, 353–363. doi: 10.1016/j.phpro.2011.03.045
5. Chiou S. Y. and Bing H. (1998) Residual stress and strains of highly textured ZrN films examined by x-ray diffraction methods. *J. Phys. D.: Appl. Phys.* – Vol. 31. – P. 349-354.
6. DSTU 3925-99 Chavun z kuliastym hraftom dlia vylyvkiv. Marky [Cast iron with nodular graphite. Brands]. Kyiv: Derzhstandart Ukrainy, 2000. 13 p (in Ukrainian).
7. F.A. P. Fernandes, S.C. Heck, R.G. Pereira, A. Lombardi-Neto, G.E. Totten, L.C. Casteletti. (2010). Wear of plasma nitrided and nitrocarburized AISI 316L austenitic stainless steel. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 40 (2): 175.
8. Guzanova A., Džupon M., Draganovská D., Brezinová J., Viňáš J., Čmurej D., Janoško E. & Maruschak P. (2020). The corrosion and wear resistance of laser and mag weld deposits. *Acta Metallurgica Slovaca*, 26 (2), 37–41. doi: 10.36547/ams.26.2.557.
9. Gvozdecki V. M. (2018). Electric arc restorative and protective coatings from cored wires. *Visnik Nacionalnoi Akademii Nauk Ukraini*, 03, 79–84. doi: 10.15407/visn2018.03.079
10. Herman V. F. (2014). Nadiinist hidromashyn i hidropriyvodiv: konspekt lektsii [Reliability of hydraulic machines and hydraulic drives: lecture notes]. Sumy : Sumskyi derzhavnyi universytet. 84 p. (in Ukrainian).
11. Hurei T.A. (2016). Pidvyshchennia znosostiikosti chavunnykh detalei poverkhnevym zmitsnenniam [Increasing the wear resistance of cast iron parts by surface hardening]. *Vestnyk KhNADU*, vyp. 74. pp. 48–52. (in Ukrainian).
12. Ivankova O. V., Harashchuk O. V., Kutsenko V. I., Shcherbyna V. V., Chyzhevskiy D. V., Babych Ya. V., Tikhonov M. O. (2020). Doslidzhennia metodiv vidnovlennia znoshenykh detalei silskohospodarskoi tekhniki [Research of methods of restoration of worn parts of agricultural machinery]. *Visnyk PDAA*. № 4. pp. 283–292 (in Ukrainian).
13. Ivasenko I., Posuvailo V., Veselivska H. and Vynar V. (2020). Porosity Segmentation and Analysis of Oxide Ceramic Coatings of D16T Alloy," *2020 IEEE 15th International Conference on Computer Sciences and Information Technologies (CSIT)*, Zbarazh, Ukraine, , pp. 50-53, doi: <https://doi.org/10.1109/CSIT49958.2020.9321900>
14. Jungedal M. (2012). Mild Impact Wear in a Concrete Mixer, An Evaluation of Wet Abrasive Wear. Master's Dissertation, Royal Institute of Technology Department of Material Science and Engineering, Stockholm, Sweden.
15. Karakurkchi A.V. (2015). Functional properties of multicomponent galvanic alloys of iron with molybdenum and tungsten. *Functional Materials*, 22 (2), 181–187. doi: 10.15407/fm22.02.181

16. Kondrat R.M., Dremliukh N.S. (2016). Doslidzhennia vplyvu rozmiru i pronyknosti shtuchno stvorenoi prysverdlovynnoi zony plasta na produktyvnu kharakterystyku sverdlovyny [Study of the influence of the size and permeability of the artificially created near-well reservoir zone on the productive characteristics of the well] *Naukovyi visnyk Ivano-Frankivskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu nafty i hazu*. № 1. pp. 14–19 (in Ukrainian).
17. Koutsokeras L. E. and Abadias G. (2012). Intrinsic stress in Zn thin films: Evaluation of grain boundary contribution from in situ wafer curvature and ex situ x-ray diffraction techniques. *J. Appl. Phys.* Vol. 111. P. 093509.
18. Leonidov L. D. J. (1987). *Erosion of pump metals Flower metals*, 6, 26–28
19. Lyashenko B.A., Solovykh Ye.K., & Mirnenko V.I. (2010). Optymizatsiia tekhnolohii nanesennia pokryttiv po kryteriakh mitsnosti ta znosostiikosti [Optimization of coating technology according to the criteria of strength and wear resistance]. Kiyev: IPP NAN Ukrainy (in Ukrainian).
20. Lyskanych M.V., Artym V.I., Hrydzuk Ya.S., Dzhus A.P. (2012). Metodyka vyznachennia dovhovichnosti elementiv burylnoi kolony v umovakh vibratsiinoho navantazhuvannia [Methodology for determining the durability of drill string elements under vibration loading conditions] *Rozvidka ta rozrobka naftovykh i hazovykh rodovysch*. № 2. pp. 113–119 (in Ukrainian).
21. Lytvynenko O.A., Nekoz O.I., Kavun V.P. (2010). Kavitatsiina stiikist keramichnykh konstruktivnykh materialiv [Cavitation resistance of ceramic structural materials] *Zbirnyk naukovykh prats VAT "UkrNDIVohnetryviv imeni A. S. Berezhnogo"* № 110. Kharkiv: "Karavela". pp.115–118 (in Ukrainian).
22. Mamazhonov M., Shakirov B., Matyakubov B., Makhmudov A. (2022). Polymer materials used to reduce waterjet wear of pump parts *Journal of Physics: Conference Series* 2176 012048
23. Mirnenko V.I., Tkach M.Ya., Pylypiv L.D. (2017). Pidvyshchennia pratsezdatsnosti zamkovykh rizbovykh ziednan burylnoi kolony impulsnym vakuumnym hazotermotsyklichnym ionno– plazmovym azotuvanniam [Increasing the performance of lock threaded joints of a drill string by pulsed vacuum gas-thermocyclic ion-plasma nitriding] *Naftohazova enerhetyka*. № 2. pp. 13–21 (in Ukrainian).
24. Mironov Yu. V., Danylychuk Yu. V., Lie K. K. (2014). Analiz yemnosti rezervuariv tsyrkuliatsiinykh system burovykh ustanovok [Analysis of the capacity of the reservoirs of circulation systems of drilling rigs] *Rozvidka ta rozrobka naftovykh i hazovykh rodovysch*. № 1. pp. 151–160 (in Ukrainian).
25. Movchan V. P., Berezhnyi M. M. Osnovy metalurhii [Basics of metallurgy]. Dnipropetrovsk: Porohy. 2001. 336 s. (in Ukrainian).
26. Mozghovyi O., Posviatenko E., Posviatenko N., Russkykh V. (2019). Odna iz prychnyn poshodzhennia shesterennykh hidromashyn [One of the causes of damage to gear hydraulic machines] *Aktualni problemy matematyky, fizyky i tekhnolohii: zb. nauk. pr. Vinnytskyi derzhavnyi pedahohichnyi universytet imeni Mykhaila Kotsiubynskoho*. Vinnytsia: TOV "Tvory". Vyp. 16. pp. 135–138 (in Ukrainian).
27. Niță A., Petrescu M.G., Dumitru T., Burlacu A., Tănase M., Laudacescu E., Ramadan I. (2023). Experimental Research on the Wear Behavior of Materials Used in the Manufacture of Components for Cement Concrete Mixers. *Materials*, 16, 2326. <https://doi.org/10.3390/ma16062326>
28. Posviatenko E.K., Kropivnyi V.M., Posviatenko N.I., Russkykh V.V. (2017). Remont shesterennykh nasosiv hidrosistem dorozhnykh mashyn [Repair of gear pumps of hydraulic systems of road vehicles] *Bulletin of Kharkov national automobile and highway university. Collection of Scientific Works*. Kh.: KhNAHU. Issue 38. P. 113–117 (in Ukrainian).
29. Ropyak L., Schuliar I., Bohachenko O. (2016). Influence of technological parameters of centrifugal reinforcement upon quality indicators of parts. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. Volume 1, Issue 5. P. 53–62. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.59850>
30. S. Ben Slima. (2012). Ion and Gas Nitriding Applied to Steel Tool for Hot Work X₃₈CrMoV₅ Nitriding Type: Impact on the Wear Resistance. *Materials Sciences and Applications, Scientific Research Publishing*, 9 (3): 640.
31. Samotugina Yu.S., Lyashenko B.A. and Bezumova O.O. (2021). Influence of Plasma Modification Technology on Structure Formation Mechanisms and Wear Resistance of High Carbon Steels and Cast Irons. *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, 43, No. 8: 1105–1119, DOI: 10.15407/mfint.43.08.1105.
32. Sarzhanov B.O. (2021). Rozrobka ekolohichno bezpechnykh metodiv vidnovlennia shnekiv mashyn tekhnolohichnoho tsykladu utylizatsii hnoiu [Development of ecologically safe methods of restoration of machine screws of the technological cycle of manure utilization]. – Dysertatsiia na zdobuttia naukovoho stupenia doktora filosofii. Sumskyi natsionalnyi ahrarynyi universytet, Sumy. 246 p. (in Ukrainian).
33. Shatskyi I.P., Perepichka V.V., and Ropyak L.Ya. (2020). On the Influence of Facing on Strength of Solids with Surface Defects. *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, 42, No. 1: 69–76, DOI: 10.15407/mfint.42.01.0069.
34. Shu-Hung Yeh, Liu-Ho Chiu, Heng Chang. (2011). Effects of Gas Nitriding on the Mechanical and Corrosion Properties of SACM 645 Steel, *Engineering, Scientific Research Publishing*, 9 (3): 942 DOI: 10.4236/eng.2011.39116.
35. Shylina O.P. (2017). Zmitsnennia stalevykh ta chavunnykh detalei termoreahuiuchymy sumishamy [Strengthening of steel and cast iron parts with thermosetting mixtures] *VMT, Sich*, vyp. 2, pp. 115–119. (in Ukrainian).
36. Shymchuk S.P. (2008). Metod doslidzhennia protyznosnykh vlastyvostei mastylnykh materialiv pry radialnykh kolyvanniakh valu. [A method of researching anti-wear properties of lubricants during radial vibrations of the shaft] *Avtoreferat dysertatsii na zdobuttia naukovoho stupenia kandydata tekhnichnykh nauk*. Kyiv. 16 p. (in Ukrainian).
37. Skoblo T.S., Rybalko N.N., Tykhonov A.V., & Martynenko A.D. (2019). Analiz sposobiv vyhotovleniya, zmitsnennia ta vidnovlennia lap kulyvatora [Analysis of methods of manufacturing, strengthening and restoration of cultivator paws]. *Tekhnichnyy servis ahropromyslovoho, lisovoho ta Transportnoho Kompleksiv*, 15, 60–85 (In Ukrainian).
38. Skoblo T.S., Sidashenko O.I., Saichuk O.V. (2019). Korpurni detali z chavuniv ta yikh yakisni pokaznyky: Monohrafiia [Casing parts made of cast iron and their quality indicators: Monograph] / Pid red. d.t.n. prof. Skoblo T.S. Kh: Disa plus. 282 p. (in Ukrainian).

39. Sposib vyrobnytstva prokatnykh valkiv [Method of production of rolling rolls]: pat. Ukraina № 105761 MPK B22D 23/00, B21B 27/00. u2015 07442. zaivl. 24.07.2015.; opubl. 11.04.2016., Biul. № 7 (in Ukrainian).
40. Storozhenko M.S. (2017). Effect of Molybdenum Additions on the Structurization of Fe–Mo Alloys and Contact Interaction in the TiB_2 –(Fe–Mo) Systems. *Powder Metall Met Ceram* 55, 617–624. <https://doi.org/10.1007/s11106-017-9847-y>
41. Student M.M., Hvozdet'skyi V.M., Stupnytskyi T.R. & Dzioba Y. V. (2017). Development of Electrometallic Equipment and Newest Consumables for Applying Protective and Reductive Coatings to Parts of Machinery Used in Mining. *Transport, and Food Processing Industries. Science and Innovation*, 13 (6), 34–38. doi: 10.15407/scine13.06.034
42. Student M.M., Dovhunyk V.M., Posuvailo V.M., Koval'chuk I.V. and Hvozdet'skyi V.M. (2017). Friction Behavior of Iron–Carbon Alloys in Couples with Plasma–Electrolytic Oxide–Ceramic Layers Synthesized on D16T Alloy. *Materials Science*, 53, No. 3: 359. <https://doi.org/10.1007/s11003-017-0083-x>
43. Tarel'nik V.B., Paustovskii A.V., Tkachenko Y.G. et al. (2017) Electric-spark coatings on a steel base and contact surface for optimizing the working characteristics of babbitt friction bearings. *Surf. Engin. Appl. Electrochem.* 53, 285–294. <https://doi.org/10.3103/S1068375517030140>
44. Tarel'nik V.B., Paustovskii A.V., Tkachenko Y.G., Martsinkovskii V.S., Konoplyanchenko E.V., Antoshevskii B. (2017). Electric-spark coatings on a steel base and contact surface for optimizing the working characteristics of babbitt friction bearings. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, 53 (3), pp. 285–294. <https://doi.org/10.3103/S1068375517030140>
45. Tarelnyk V. B., Gaponova O. P. and Konoplianchenko Ye. V. (2022). Electric-Spark Alloying of Metal Surfaces with Graphite. *Progress in Physics of Metals*, 23, No. 1: 27–58
46. Tarelnyk V. B., Gaponova O. P., Loboda V. B., Konoplyanchenko E. V., Martsinkovskii V. S., Semirnenko Yu. I., Tarelnyk N. V., Mikulina M. A. and Sarzhanov B. A. (2021). Improving Ecological Safety when Forming Wear-Resistant Coatings on the Surfaces of Rotation Body Parts of 12Kh18N10T Steel Using a Combined Technology Based on Electrospark Alloying. *Surf. Eng. Applied Electrochemistry*, 57: 173.
47. Tarelnyk V. B., Gaponova O. P., Melnyk V. I., Tarelnyk N. V., Zubko V. M., Vlasovets V. M., Konoplianchenko Ie. V., Bondarev S. G., Radionov O. V., Mayfat M. M., Okhrimenko V. O. and Tkachenko A. V. (2023) The Surfaces Properties of Steel Parts with Wear-Resistant Coatings of the 1M and 90 % BK6 + 10 % 1M Composition Applied by the Method of Electrospark Alloying with the Use of Special Technological Environments. Pt. 1. The Strengthened-Surfaces' Structural State Features. *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.* vol. 45, pp. 683-706
48. Tarelnyk V., Konoplianchenko I., Gaponova O., Sarzhanov B. (2020). Assessment of Hydroabrasive Wear Resistance of Construction Materials with Functional Coatings, which are Formed by Resource-Saving and Environmentally Friendly Technologies. *Key Engineering Materials*. vol 864, p. 265–277. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.864.265>
49. Tarelnyk V., Martsynkovskyy V., Gaponova O., Konoplianchenko I., Belous A., Gerasimenko V., Zakharov M. (2017). New method for strengthening surfaces of heat treated steel parts. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 233 (1), art. no. 012048. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/233/1/012048>
50. Tarelnyk V., Martsynkovskyy V., Gaponova O., Konoplianchenko I., Dovzyk M., Tarelnyk N., Gorovoy S. (2017). New sulphiding method for steel and cast iron parts *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 233 (1), art. no. 012049. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/233/1/012049>
51. Tarelnyk V.B., Gaponova O.P., Konoplianchenko Ye.V., Martsynkovskyy V.S., Tarelnyk N.V. and Vasilenko O.O. (2019). Improvement of Quality of the Surface Electroerosive Alloyed Layers by the Combined Coatings and the Surface Plastic Deformation. III. The Influence of the Main Technological Parameters on Microgeometry, Structure and Properties of Electrolytic Erosion Coatings. *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, 41, No. 3: 313–335, <https://doi.org/10.15407/mfint.41.03.0313>
52. Tarelnyk V.B., Gaponova O.P., Konoplianchenko Ye.V., Martsynkovskyy V.S., Tarelnyk N.V., Vasilenko O.O. (2019). Improvement of quality of the surface electroerosive alloyed layers by the combined coatings and the surface plastic deformation. I. Features of formation of the combined electroerosive coatings on special steels and alloys, *Metallofizika i Noveishie Tekhnologii*, 41 (1), pp. 47-69. <https://doi.org/10.15407/mfint.41.01.0047>
53. Tarelnyk V.B., Gaponova O.P., Loboda V.B., Konoplyanchenko E.V., Martsinkovskii V.S., Semirnenko Yu.I., Tarelnyk N.V., Mikulina M.A., Sarzhanov B.A. (2021). Improving Ecological Safety when Forming Wear-Resistant Coatings on the Surfaces of Rotation Body Parts of 12Kh18N10T Steel Using a Combined Technology Based on Electrospark Alloying. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, 57: 173. <https://doi.org/10.3103/S1068375521020113>
54. Tarelnyk V.B., Konoplianchenko I.V., Gaponova O.P., Sarzhanov O.A., Antoszewski B. (2020). Effect of Laser Processing on the Qualitative Parameters of Protective Abrasion-Resistant Coatings. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, 58 (11-12), pp. 703–713.
55. Trembach B.O., Sukov M.G., Vynar V.A., Trembach I.O., Subbotina V.V., Rebrov O.Yu., Rebrova O.M. and Zakiev V.I. (2022). Effect of Incomplete Replacement of Cr for Cu in the Deposited Alloy of Fe–C–Cr–B–Ti Alloying System with a Medium Boron Content (0.5 % wt.) on its Corrosion Resistance. *Metallofizika i Noveishie Tekhnologii*, 44, No. 4: 493; <https://doi.org/10.15407/mfint.44.04.0493>
56. Ukrainska radianska entsyklopediia [Ukrainian Soviet encyclopedia] : u 12 t. / hol. red. M. P. Bazhan ; redkol.: O. K. Antonov ta in. – 2-he vyd. – K. : Holovna redaktsiia URE, 1974–1985. (in Ukrainian).
57. Ulugojayev K. Kh. (1989). Removal of axial pumps, Tashkent: Mehnat
58. Umanskyi O., Storozhenko M., Baglyuk G., Melnyk O., Brazhevsky V., Chernyshov O., Terentiev O., Gubin Yu., Kostenko O., Martsenyuk I. (2020). Structure and Wear Resistance of Plasma-Sprayed NiCrBSiC–TiCrC Composite Powder Coatings. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, 59, № 7-8: 434–444. <https://doi.org/10.1007/s11106-020-00177-y>
59. Yar-Mukhamedova G.S., Sakhnenko N.D., Ved', M. V., Yermolenko, I. Y., & Zyubanova, S. I. (2017). Surface analysis of Fe–Co–Mo electrolytic coatings. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 213, 012019. doi: 10.1088/1757-899X/213/1/012019

Tarelnyk N. V., Candidate of Economic Sciences, Associate Professor, Sumy National Agrarian University, Sumy, Ukraine
Gaponova O. P., Doctor of Technical Sciences, Professor, Sumy State University, Sumy, Ukraine
Maifat M. M., PhD student, Sumy National Agrarian University, Sumy, Ukraine
Vasylenko M. Yu., PhD student, Sumy National Agrarian University, Sumy, Ukraine
Heiko T. O., Student, Sumy National Agrarian University, Sumy, Ukraine

Problems and prospects for solving the issues of increasing the durability of machine parts operating under conditions of hydroabrasive wear

The article focuses on a large number of machines operating in various branches (gas-oil, mining, chemical, agricultural, transport ones, etc.) of industry and other fields in Ukraine that are subject to the negative impact of hydro abrasive wear (HW). These are hydraulic machines (HM), among which the most common are pumps and hydraulic engines, as well as centrifuges for wastewater treatment, separators, fitting, etc. The safety, productivity, mobility and efficiency of drilling rigs, structural elements of drill strings, the use of gravel filters to prevent the inflow of sand from the bed into the well, and the occurrence of emergencies associated with the destruction of the surface layers of the component parts and assemblies depend on the HW negative impact. The machine parts, the surfaces of which are in contact with fluid flows and operate in harsh environmental conditions, are subject to wear. The wear depends on the type of friction, mechanical and physicochemical properties of the material, the speed of relative movement of the contacting surfaces, the magnitude and nature of the load, the type and quality of lubricating oils, operating conditions, etc. There are several types of wear: corrosion, erosion, hydro abrasive wear, cavitation, biological damage.

To protect the surfaces of steel and cast iron parts from wear, in addition to strengthening the surface layers, among which the thermochemical treatment (TCT) occupies a special place, there are used protective coating technologies. Those are such ones as depositing and surfacing with hard wear resistant materials, laser processing of slip coatings, and electroplating, which are harmful to human health and hazardous to the environment. Among the effective, energy-saving, and environmentally friendly technologies for applying protective coatings, the electric spark alloying (ESA) process occupies a special place. As combined with surface plastic deformation (SPD) and application of metal-plastic materials (MPM) reinforced with powders of hard wear resistant materials (tungsten carbide and zirconium nitride), the ESA process can provide protection of parts from hydro abrasive and other types of wear.

Key words: electric spark alloying, high-strength cast iron, steel, part, hydro abrasive wear, coating, surface plastic deformation, metal-polymer material.

ВПЛИВ РОЗПОДІЛУ ВАГИ НА ВІСІ МІНІТРАКТОРА НА ЙОГО ТЯГОВІ ПОКАЗНИКИ ЗА ІМІТАЦІЙНИМИ ЦИКЛАМИ POWERMIX

Ткачов В'ячеслав Юрійович

старший викладач

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна

ORCID: 0000-0003-4619-5758

engineer.viacheslav@gmail.com

Кожушко Андрій Павлович

доктор технічних наук, доцент

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна

ORCID: 0000-0002-4725-5911

Andreykozhusko7@gmail.com

В умовах погіршення навколишнього середовища викидами та зменшенням запасів викопного палива в різних промислових галузях перспективним шляхом є переведення засобів на альтернативну чисту енергію. Такий розвиток спонукає до модернізації не тільки автомобільної, а й іншої спеціалізованої техніки, зокрема, колісних тракторів. В сільському господарстві використовуються трактори різних тягових класів для виконання тягових і транспортних робіт. Актуальним на сьогоднішній день є впровадження електроприводу на трактори малих тягових класів, які призначені для міжрядної обробки просапних культур, оранки легких ґрунтів в садах і теплицях, для роботи з косаркою, а також для дрібних транспортних робіт. Таке впровадження реалізується заміною двигуна внутрішнього згоряння на електричний привід, у зв'язку з цим виникає задача дотримання тягових властивостей трактора. Тому матеріал даної статті має за мету чисельний аналіз впливу розподілу ваги мінітрактора на його тягово-енергетичні показники. Реалізація окресленої мети відбувається за рахунок імітаційного чисельного експерименту тягових випробувальних циклів. При вирішенні поставленої мети використовується методика динамічних випробувань Німецького сільськогосподарського товариства DLG-PowerMix, яка налічує 12 етапів випробувань сільськогосподарського трактора на польових операціях при варіюваному зовнішньому навантаженні. Результатом є обґрунтований підбір умовного розподілу загальної ваги мінітрактора з дотриманням максимальних середніх значень швидкості руху і ККД трактора, а також мінімального середнього значення буксування, як тих що доцільно впроваджувати в електротрактор. Практична значимість роботи полягає у наданні конкретних значень розподілу ваги на вісі мінітрактора при агрегуванні плугом, культиватором, роторною фрезою та сінокосаркою, а також з урахуванням роботи машини для розкидання ґною та машини для тюкування сіна. Науковою новизною роботи є встановлення взаємозв'язку між конструктивними параметрами мінітрактора та зміною тягово-енергетичних показників в ході виконання технологічних робіт, а саме між розподілом ваги трактора та швидкістю, ККД трактора та буксуванням коліс.

Ключові слова: трактор, тягово-енергетичні показники, польова операція, розподіл ваги, випробувальні цикли, PowerMix, імітаційне моделювання.

DOI <https://doi.org/10.32782/msnau.2023.4.9>

Вступ. Упродовж останнього десятиліття у світі великого розповсюдження набула електрифікація транспортних засобів, як автомобілів, так і тракторів. Це, передусім, покликано вирішити проблеми погіршення навколишнього середовища забруднюючими викидами та зменшенням запасів викопного палива. З аналізу сучасного стану впровадження електричних силових установок на трактори і сільськогосподарські машини (Moreda et al., 2016) доведено, що використання електричних приводів призводить до підвищення енергоефективності, а також забезпеченням універсальності сільськогосподарської діяльності. Більшість виробників тракторів сільськогосподарського призначення представили свої концепти на виключно електричній та/або гібридній силовій установці (Kozhushko et al., 2022): Fendt e100 Vario; John Deere Joker; Kramer 5055e; Escorts Farmtrac 26E; Case ProHybrid EECVT; JCB 525-60e; Multi Tool Trac; XT3-2511E; Kolos-244, тощо.

Більшість з виробників тракторної техніки (Danylenko et al., 2023) впроваджують електричний привод на малопотужні мінітрактори, що, на їх думку, повинно надати стрімкого розвитку фермерського господарства. Використання малопотужних мінітракторів обумовлено їх універсальністю (Danylenko et al., 2023), адже використовуються у комплексі зі змінними навісними, напівнавісними та причіпними сільськогосподарськими агрегатами (рис. 1), тому конструкція електротрактора повинна враховувати роботу валу відбору потужності. Така універсальність мінітракторів повинна забезпечувати реалізацію тягових та енергетичних показників.

З роботи (Gade & Wahab, 2023) відомо, що найбільш простою та розповсюдженою є конструкційна схема силової установки електротрактора, яка передбачає заміну двигуна внутрішнього згоряння на електричний привід. Така схема, на думку (Liu et al., 2016), не вимагає поглиблених конструкційних рішень, але еквівалентно замінити масову складову двигуна



Рис. 1. Роботи сільськогосподарського призначення, які реалізовує мінітрактор ХТЗ-2511

внутрішнього згоряння – складно, що вимагає аналізу розподілу ваги по осях мінітрактора на тягового-енергетичні показники. Проведення комплексної оцінки тягового-енергетичних показників трактора доцільно проводити у складі тягових та тягово-привідних машинно-тракторних агрегатів (Lebedev et al., 2004). Таку ж концепцію пропонують закордоном, де запропоновано методику тягово-динамічних випробувань Німецького сільськогосподарського товариства (DLG, Deutsche Landwirtschafts-Gesellschaft), яке публікує результати випробувань тракторів за процедурою PowerMix (DLG, 2023; Rebrov et al., 2020).

Виходячи з вищевикладеного, метою даного дослідження є оцінка впливу розподілу ваги мінітрактора (типу ХТЗ-2511) на тягово-енергетичні показники за рахунок використання імітаційних випробувальних циклів PowerMix.

Матеріали і методи досліджень. Визначення тягово-енергетичних показників трактора (розрахункова схема якого наведена на рис. 2) ґрунтується на обчисленні системи диференціальних рівнянь (Kalchenko et al., 2021).

$$\begin{cases} m \cdot \ddot{X} + P_{kr} = 2(P_{o1} + P_{o2}); \\ m \cdot (\ddot{Z} + g) + P_{krz} = 2(G_{k1} + G_{k2}); \\ \frac{J_o \cdot \ddot{\varphi}_o}{2} + G_{k1}(X_{o1} - X) + G_{k2}(X_{o2} - X) = \\ = \frac{P_{krz}}{2}(X_{o3} - X) - P_{o1}(Z_{o1} - Z) + P_{o2}(Z_{o2} - Z) + \frac{P_{kr}}{2}(Z_{o3} - Z), \end{cases} \quad (1)$$

де X, Z, φ_o – узагальнені координати; P_{o1}, P_{o2} – сили, що штовхають остов трактора вперед; G_{k1}, G_{k2} – радіальні навантаги на шини; P_{kr}, P_{krz} – горизонтальна та вертикальна складові сили тяги на гаку; $x_{o1}, x_{o2}, x_{o3}, z_{o1}, z_{o2}, z_{o3}$ – горизонтальні і вертикальні координати точок остова трактора у обраній системі відліку.

Для реалізації системи диференціальних рівнянь (1) необхідно встановити взаємозв'язки між координатами точок остова трактора та узагальненими координатами

$$\begin{aligned} X_{oi} &= X - \rho \cdot \cos(\varphi_o + \lambda_{oi}); \\ Z_{oi} &= Z + \rho \cdot \sin(\varphi_o + \lambda_{oi}), \end{aligned} \quad (2)$$

де ρ_{oi}, λ_{oi} – радіуси-вектори і кути точок остова трактора у полярній системі координат з центром в точці O .

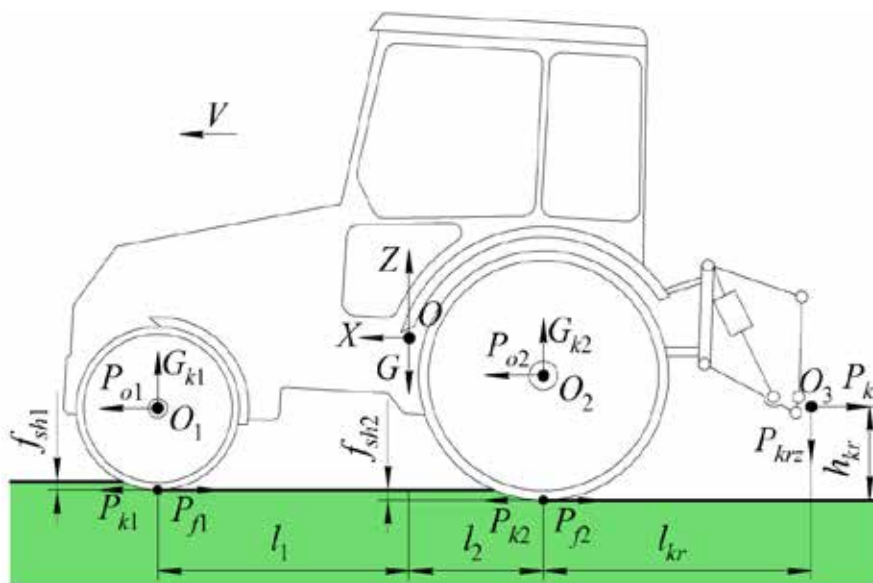


Рис. 2. Розрахункова схема трактора

Таким чином радіальний прогин шин визначається наступним чином:

$$\begin{aligned} f_{sh1} &= D_1/2 + Z_{G1} - Z_{o1}; \\ f_{sh2} &= D_2/2 + Z_{G2} - Z_{o2}, \end{aligned} \quad (3)$$

де D_1, D_2 – зовнішній діаметр шини; Z_{G1}, Z_{G2} – вертикальні координати рівня ґрунту, які у загальному випадку є випадковими функціями пройденого шляху. Визначення пружних характеристик шин трактора ХТЗ-2511 з типорозмірами 7,5R16 та 9,5R32 базувались на роботі (Rebrov, 2015).

Для визначення сил P_{oi} , що штовхають озов трактора вперед необхідно знати дотичні сили тяги P_{ki} та сили опору коченню P_{fi} на кожному колесі:

$$P_{oi} = P_{ki} - P_{fi}. \quad (4)$$

Сила опору коченню P_{fi} визначається, у тому числі, за величиною пресування ґрунту h_{gi} або глибини колії після N -го проходу колеса:

$$P_{fi} = \sum_{i=1}^N \left(\frac{0,81 \cdot k_0 \cdot k_N}{100 \cdot \sqrt{a_k \cdot b_k}} \cdot b_{ki} \cdot h_{gi}^2 \right). \quad (5)$$

де k_0, k_N – коефіцієнт об'ємного зминання ґрунту (Panov & Vetokhyn, 2008) та коефіцієнт, що враховує зміну фізико-механічних властивостей ґрунту, який для перших чотирьох проходів N можна визначити з достовірністю $R^2 = 0,999$; a_{ki}, b_{ki} – довжина і ширина плями контакту i -тої шини з ґрунтом; h_{gi} – деформації ґрунту (Rebrov, 2021) під кожним i -тим колесом трактора визначається за формулою:

$$h_{gi} = \sqrt[3]{\frac{G_{ki}^2}{\left(\frac{k_0 \cdot k_N}{100 \cdot \sqrt{a_k \cdot b_k}} \right)^2 \cdot b_{ki}^2 \cdot D_i \cdot \left(1 + \frac{f_{mi}}{h_{gi}} \right)}}. \quad (6)$$

Визначення радіальних навантажень на колеса трактора відбувається наступним чином

$$G_{k1} = G \frac{l_2}{2L} - \left(P_{k1} - G \cdot f \cdot \frac{l_2}{L} \right) \cdot \frac{h_{kr}}{2L} \quad (7)$$

$$G_{k2} = G \frac{l_1}{2L} - \left(P_{k2} - G \cdot f \cdot \frac{l_1}{L} \right) \cdot \frac{h_{kr}}{2L} \quad (8)$$

де L – поздовжня база трактора; l_1 та l_2 – відстань від центра тягіння до осей переднього та заднього мостів;

f – коефіцієнт опору кочення коліс; h_{kr} – висота точки дії сили тяги на гаку від опорної поверхні.

Єдиною невідомою величиною є буксування коліс трактора, яке визначається відомою залежністю дійсної та теоретичною швидкостей. Підсумовуючи вище зазначене та врахування зміни коефіцієнтів буксування стає можливим визначення дотичної сили тяги переднього колеса P_{k1} та заднього ведучого P_{k2} .

$$P_{k1} = (C_c \cdot F_k + G \cdot \operatorname{tg} \varphi_c); \quad (9)$$

$$P_{k2} = (C_c \cdot F_k + G \cdot \operatorname{tg} \varphi_c) \cdot \left\{ 1 - \frac{k_c \cdot (1 - \delta_2)}{a_k \cdot \delta_2} \cdot \left[1 - e^{-\frac{a_k \cdot \delta_2}{k_c \cdot (1 - \delta_2)}} \right] \right\}, \quad (10)$$

де C_c – напруга зсуву в ґрунті; φ_c – кут внутрішнього тертя в ґрунті; k_c – коефіцієнт деформації в ґрунті.

Процедура випробувальних циклів PowerMix складається з 12 етапів випробувань сільськогосподарського трактора на польових операціях при варіюваному зовнішньому навантаженні: оранки та культивування, тягово-приводних циклів з відбором потужності через вал відбору потужності (ВВП): фрезерування роторною фрезою і ворошіння сіна, а також тягово-приводні цикли з відбором потужності через ВВП і гідравлічну систему трактора: розкидання гною і тюкування сіна (табл. 1).

Загальний вигляд циклів навантаження наведемо на рис. 3. Окреслені цикли зміни зовнішніх навантажень запропоновані як тестові процедури при обчисленні тягової ефективності тракторів.

Таким чином, представлення базові складові для визначення впливу розподілу ваги мінітрактора на тягово-енергетичні показники. Згідно з табл. 1 найбільші навантаження трактор сприймає на тягових роботах: оранка (Z1P і Z2P) та культивування (Z1G і Z2G).

Результати. В ході імітаційного моделювання приймалися вихідні дані, які рекомендуються заводом-виробником (KhTZ-2511, 2005): маса – 2200 кг; тиск в передніх шинах 7,5R16 – 200 кПа; тиск в задніх шинах 9,5R32 – 80 кПа; поздовжня база – 1,837 м; агрофон – стерня колосових (Panov & Vetokhyn, 2008), тощо.

Таблиця 1

Цикли PowerMix для польових операцій (Rebrov et al., 2020)

Тип роботи	Цикл	Навантаження, %	$n_{\text{ВВП}}, \text{хв}^{-1}$	Умови проведення
Тягова	Оранка Z1P	100	–	Зниження середньої швидкості не більше 2,5 км/год (окрім циклу Z1P, якщо трактор не може розвинути більшу тягову потужність).
	Оранка Z2P	60	–	
	Культивування Z1G	100	–	
	Культивування Z2G	60	–	
Тяговоприводна	Фрезерування Z3K	100	900	Зниження середньої швидкості не більше 2,5 км/год та середньої частоти обертання хвостовика ВВП не більше 7,5 %.
	Фрезерування Z4K	70	900	
	Фрезерування Z5K	40	900	
	Ворошіння Z3M	100	900	
	Ворошіння Z4M	70	900	
	Ворошіння Z5M	40	900	
Тягово-приводна, гідравлічна	Розкидання гною Z6MS	100	1000	
	Тюкування сіна Z7PR	100	1000	

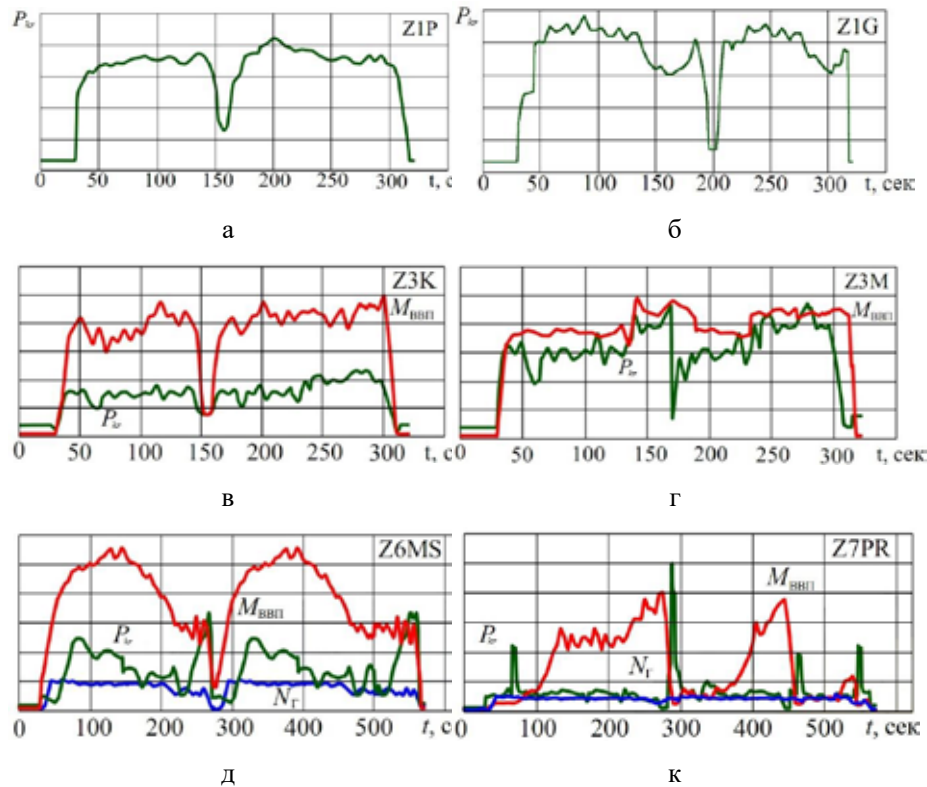


Рис. 3. Цикли PowerMix для імітації польових операцій:

а – агрегування плугом Z1P, Z2P; б – агрегування культиватором Z1G, Z2G; в – агрегування роторною фрезєю Z3K, Z4K, Z5K; г – агрегування сінокосаркою Z3M, Z4M, Z5M; д – машина для розкидання гною Z6MS; к – машина для тюкування сіна Z7PR

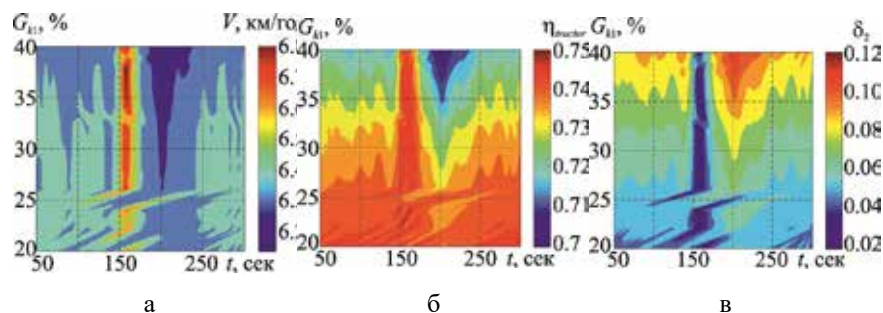


Рис. 4. Залежність тягово-енергетичних показників трактора ХТЗ-2511 від розподілу загальної ваги на передню вісь G_{k1} та часу t циклу PowerMix Z1P (рис. 3):

а – швидкість V ; б – ККД трактора $\eta_{\text{трактор}}$; в – буксування задніх коліс δ_2

Обговорення. На рис. 4 наведено результати зміни тягово-енергетичних показників при імітаційному моделюванні циклу PowerMix Z1P, який показав варіювання швидкості $V \in [6,14; 6,8]$ км/год, ККД трактора $\eta_{\text{трактор}} \in [0,7; 0,75]$, буксування задніх коліс $\delta_2 \in [0,02; 0,12]$. Дані результати отримані при варіюванні розподілу загальної ваги, яка припадає на передню вісь G_{k1} , і змінюється в межах $20 \div 50$ %. Результати з рис. 4 є не унормованими, що ускладнює надання практичних результатів, тому на рис. 5 показано середні значення показників за період імітації циклу PowerMix.

Аналізуючи отримані результати з рис. 5, відмітимо, що досягнення максимальних середніх значень

швидкості і ККД трактора, а також мінімального середнього значення буксування для циклу:

Z1P → при $G_{k1} = 20$ % від G ($l_1 = 0,367$ м та $l_1 = 1,47$ м);
 Z2P → при $G_{k1} = 21$ % від G ($l_1 = 0,386$ м та $l_1 = 1,451$ м);
 Z1G → при $G_{k1} = 22$ % від G ($l_1 = 0,404$ м та $l_1 = 1,433$ м);
 Z2G → при $G_{k1} = 33$ % від G ($l_1 = 0,606$ м та $l_1 = 1,231$ м);
 Z3K → при $G_{k1} = 22$ % від G ($l_1 = 0,404$ м та $l_1 = 1,433$ м);
 Z4K → при $G_{k1} = 30$ % від G ($l_1 = 0,551$ м та $l_1 = 1,286$ м);
 Z5K → при $G_{k1} = 40$ % від G ($l_1 = 0,735$ м та $l_1 = 1,102$ м);
 Z3M → при $G_{k1} = 40$ % від G ($l_1 = 0,735$ м та $l_1 = 1,102$ м);
 Z4M → при $G_{k1} = 47$ % від G ($l_1 = 0,863$ м та $l_1 = 0,974$ м);
 Z5M → при $G_{k1} = 50$ % від G ($l_1 = 0,919$ м та $l_1 = 0,919$ м);
 Z6MS → при $G_{k1} = 40$ % від G ($l_1 = 0,735$ м та $l_1 = 1,102$ м);
 Z7PR → при $G_{k1} = 50$ % від G ($l_1 = 0,919$ м та $l_1 = 0,919$ м).

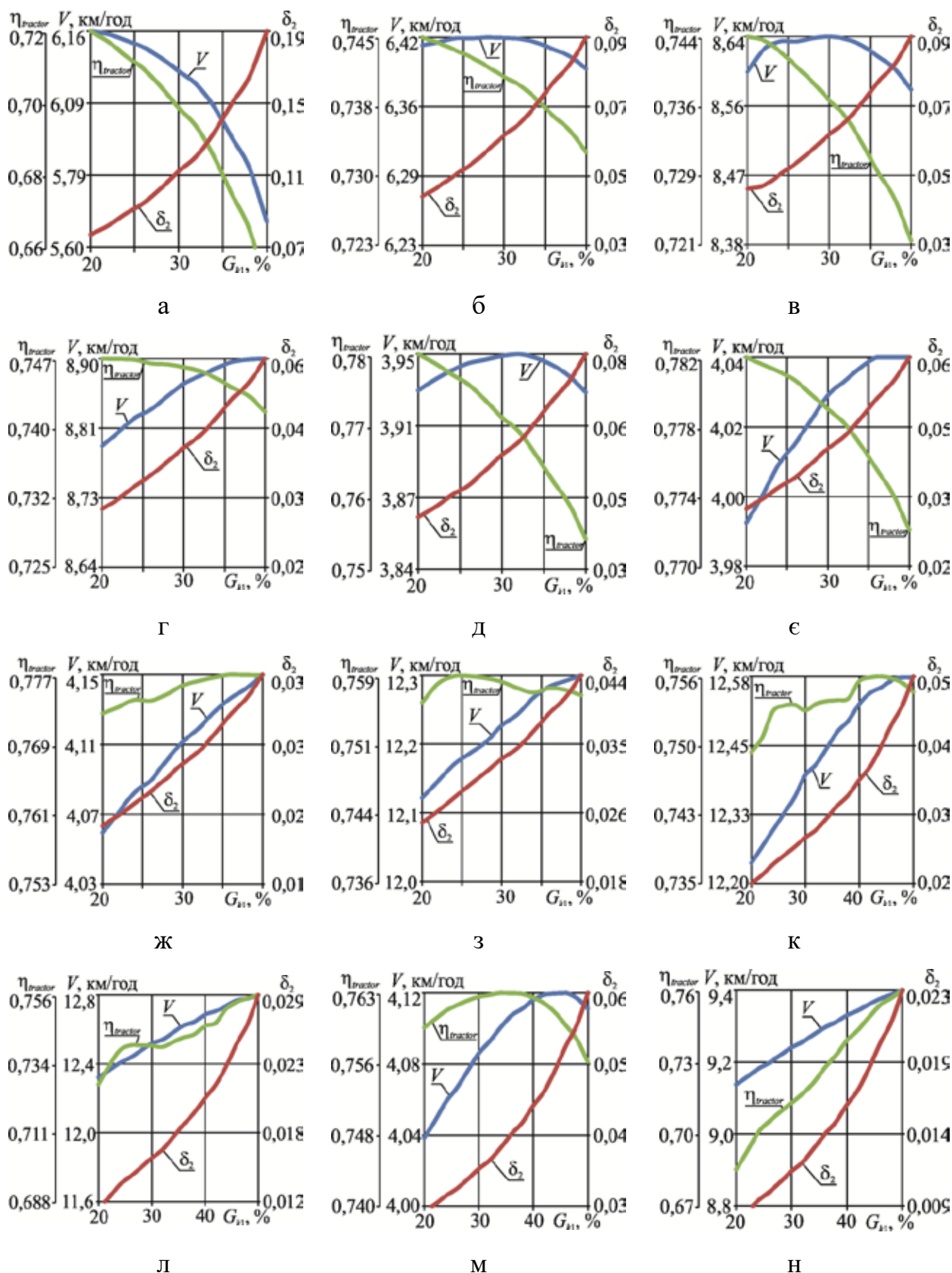


Рис. 5. Середні значення тягово-енергетичних показників трактора ХТЗ-2511 від розподілу загальної ваги на передню вісь G_{a1} при різноманітних циклах PowerMix:

а – Z1P; б – Z2P; в – Z1G; г – Z2G; д – Z3K; е – Z4K; ж – Z5K; з – Z3M; к – Z4M; л – Z5M; м – Z6MS; н – Z7PR

Як помітно з результатів значення умовного розподілу загальної ваги, яка припадає на передню вісь G_{k1} , має широкий діапазон змін для ефективнішої реалізації тягово-енергетичних показників. Такий розподіл ваги складно реалізувати, тому наступним кроком необхідно проаналізувати вплив тиску в шинах і скорегувати отриманий розподіл.

Висновки. В ході популярного процесу впровадження електричного приводу замість двигуна внутрішнього згоряння в мінітрактори типу ХТЗ-2511 актуальним стає питання підбору складових електроприводу. Такий підбір повинен ґрунтуватися на вагові характеристики, які впливають на тягово-енергетичні показники.

На основі процедури випробувальних циклів PowerMix для сільськогосподарського трактора при виконанні польових операцій отримано значення умовного розподілу загальної ваги мінітрактора з метою отримання максимальних середніх значень швидкості і ККД трактора, а також мінімального середнього значення буксування. Для агрегування плугом Z1P, Z2P отримано розподіл в межах 20/80 %; агрегування культиватором Z1G, Z2G – 27/73 %; агрегування роторною фрезою Z3K, Z4K, Z5K – 31/69 %; агрегування сінокосаркою Z3M, Z4M, Z5M – 45/55 %; машина для розкидання гною Z6MS 40/60 %; машина для тюкування сіна Z7PR – 50/50 %.

Бібліографічні посилання:

1. Danylenko, V., Tkachov, V., Kozhushko, A. & Horbov, O. (2023). Obgruntuvannya konstruktsiynoho vyboru sylovoi ustanovy elektrotraktora [Justification of the design choice of the electric tractor power plant]. *Visnyk NTU "KhPI". Ser. : Avtomobile- ta traktorobuduvannya*, № 2, pp. 43–51. (in Ukrainian). doi:10.20998/2078-6840.2023.2.05.
2. DLG Test Report database (2023). *DLG Agriculture*. Retrieved from: <https://www.dlg.org/en/agriculture/tests/query-for-test-reports/>.
3. Gade, C.R. & Wahab, R.S. (2023). Conceptual framework for modelling of an electric tractor and its performance analysis using a permanent magnet synchronous motor. *Sustainability*, Vol. 15 (19), 14391. doi:10.3390/su151914391.
4. Kalchenko, B., Rebrov, O., Mamontov, A., Kozhushko, A. & Yakunin, M. (2021). *Dynamika rukhu kolisnykh traktoriv : monohrafiia* [Dynamics of movement of wheeled tractors: monograph]. Kharkiv : Miroshnychenko O.A., 320 p. (in Ukrainian)
5. KhTZ-2511 and KhTZ-3510 tractors. Operating instructions (2005). *Kharkiv Tractor Plant*. Retrieved from: <http://xtz.ua/files/pdf/2511.pdf>.
6. Kozhushko, A., Danylenko, V. & Selevich, S. (2022). Analiz rozvytku transmissiinykh ustanovok suchasnykh kolisnykh traktoriv [Analysis in development of transmissions for modern wheeled tractors]. *Visnyk NTU "KhPI". Ser. : Avtomobile- ta traktorobuduvannya*, № 2, pp. 118–131. (in Ukrainian). doi:10.20998/2078-6840.2022.2.13.
7. Lebedev, A., Shevchenko, Y. & Kot, A. (2004). Balans potuzhnosti ta KKD traktornoho ahrehatu z pryvodom vid VVP aktyvnykh robochykh orhaniv silhospmashyn [Balance of power and efficiency of a tractor unit driven by the PTO of active working bodies of agricultural machines]. *Visnyk KhNTUSH im. P. Vasylenka. Seriya: Tekhnichni nauky*, № 107, t. 2. C. 154–161. (in Ukrainian)
8. Liu, M., Xu, L. & Zhou, Zh. (2016). Design of a Load Torque Based Control Strategy for Improving Electric Tractor Motor Energy Conversion Efficiency. *Mathematical Problems in Engineering*, Vol. 2016. doi:10.1155/2016/2548967.
9. Moreda, G.P., Muñoz-García, M.A. & Barreiro, P. (2016). High voltage electrification of tractor and agricultural machinery – A review. *Energy Conversion and Management*, vol. 115, pp. 117–131. doi:10.1016/j.enconman.2016.02.018.
10. Panov, I. M. & Vetokhyn, V.I. (2008). *Fizychni osnovy mekhaniky gruntiv* [Physical foundations of soil mechanics]. Kyiv : Fenyks, 266 p.
11. Rebrov, O. (2015). Identyfikatsiia silskohospodarskykh traktornykh shyn chyselnykh metodom [Identification of agricultural tractor tires by numerical method]. *Visnyk NTU "KhPI". Ser. : Matematychni modeliuvannya v tekhnitsi ta tekhnolohiakh*, № 6 (1115), pp. 114–121 (in Ukrainian).
12. Rebrov, O. (2021). *Vybir parametriv shyn silskohospodarskykh traktoriv: monohrafiia* [Selection of agricultural tractor tire parameters: monograph]. Kharkiv: Miroshnychenko O.A., 304 p. (in Ukrainian).
13. Rebrov, O., Kozhushko, A., Kalchenko, B., Mamontov, A., Zakovorotniy, A., Kalinin, E. & Holovina, E. (2020). Mathematical model of diesel engine characteristics for determining the performance of traction dynamics of wheel-type tractor. *EUREKA: Physics and Engineering*, № 4, P. 90 – 100. doi:10.21303/2461-4262.2020.001352.

Tkachov V. Yu., National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine

Kozhushko A. P., Doctor of Engineering Science, Associate Professor, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine

Influence of axle weight distribution a minitractor weight distribution on its traction indicators under simulated PowerMix cycles

In the conditions of deterioration of the environment due to emissions and reduction of fossil fuel reserves in various industrial sectors, the transfer of funds to alternative clean energy is a promising way. This development encourages the modernization of not only automotive, but also other specialized equipment, in particular, wheeled tractors. In agriculture, tractors of various traction classes are used for traction and transport work. Today, the introduction of an electric drive on tractors of small traction classes, which are intended for inter-row processing of row crops, plowing light soils in gardens and greenhouses, for working with a mower, as well as for small transport works, is relevant today. Such implementation is implemented by replacing the internal combustion engine with an electric drive, in connection with this, the task of observing the traction properties of the tractor arises. Therefore, the material of this article aims to numerically analyze the influence of the weight distribution of the minitractor on its traction and energy indicators. The implementation of the outlined goal takes place at the expense of a simulated numerical experiment of traction test cycles. When solving the

goal, the German Agricultural Society DLG-PowerMix dynamic testing method is used, which includes 12 stages of testing an agricultural tractor in field operations under varied external loads. The result is a justified selection of the conditional distribution of the total weight of the minitractor with observance of the maximum average values of the speed of movement and efficiency of the tractor, as well as the minimum average value of skidding, as those that should be implemented in an electric tractor. The practical significance of the work consists in providing specific values of weight distribution on the axis of the minitractor when aggregating with a plow, a cultivator, a rotary cutter and a hay mower, as well as taking into account the operation of a manure spreader and a hay baler. The scientific novelty of the work is the establishment of the relationship between the design parameters of the minitractor and the change in traction and energy indicators during the execution of technological works, namely between the weight distribution of the tractor and the speed of movement, tractor efficiency and wheel slippage.

Key words: tractor, traction-energy indicators, field operation, weight distribution, test cycles, PowerMix, simulation modeling.

ІНЖЕНЕРНА ПЕДАГОГІКА У ПІДГОТОВЦІ ІНЖЕНЕРІВ І НАУКОВО-ПЕДАГОГІЧНИХ КАДРІВ ЗАКЛАДІВ ВИЩОЇ ОСВІТИ

Хурсенко Світлана Миколаївна

кандидат фізико-математичних наук, доцент
Сумський національний аграрний університет м. Суми, Україна

ORCID 0000-0001-6307-2042

svitlana.khursenko@snau.edu.ua

Одним з визначальних факторів технологічного розвитку сучасного суспільства виступає якісна інженерна освіта. Безперервний розвиток інженерної діяльності – її модернізація, вдосконалення, експансія в інші сфери діяльності – вимагає коригування, оновлення цілей, засобів та методології освітньої діяльності загалом та інженерної педагогіки зокрема. У професійному співтоваристві нині активно обговорюються роль та місце інженерної педагогіки в інженерній діяльності, висвітлюється її значущість для розвитку сучасної інженерної освіти. Інженерна педагогіка націлена на те, щоб випускники закладів вищої освіти були ефективними в обраній ними інженерній діяльності, конкурентоспроможними, готовими брати активну участь у її інноваційному розвитку. При всій винятковій важливості фундаменталізації інженерної освіти, розвитку у майбутніх інженерів системного мислення, адаптивності та необхідного набору компетенцій, сьогодні у фокусі інженерної педагогіки мають бути питання нової методології інженерної діяльності.

Сьогодні інженерна педагогіка постає перед нами як самостійна галузь наукового знання, яка за рахунок взаємодії з технічними науками і технікою педагогічно впливає на розвиток особистості здобувача вищої освіти, створює умови для формування багатогранної особистості інженера. Поряд з цим, сучасна парадигма вищої освіти зумовлює необхідність спеціальної підготовки викладацьких кадрів, що інтегрує технічні, технологічні та людинознавчі знання в галузі педагогіки та психології та відповідає вимогам інженерно-педагогічної діяльності. Очевидно, що така підготовка науково-педагогічних кадрів, як і інженерна підготовка, потребують подальшого розвитку методології та теорії.

У статті розглянуто такі методологічні компоненти інженерної педагогіки, як об'єкт та предмет, цілі та завдання, принципи, методи та організаційні форми навчання, засоби та результати навчання в контексті процесів науково-технічного пізнання та інженерної діяльності. З позицій сьогодення уточнено предмет вивчення інженерної педагогіки, її загальнодидактичні та спеціальні принципи. Розглянуто орієнтири інженерної педагогіки: процеси науково-технічного пізнання та інженерної діяльності.

Ключові слова: педагогіка, інженерія, інженерна педагогіка, інженерна діяльність, адаптивність, методологія, принципи, форми навчання.

DOI <https://doi.org/10.32782/msnau.2023.4.10>

Постановка проблеми. Якісна інженерна освіта виступає найважливішим фактором та головним критерієм технологічного розвитку суспільства. Світова практика показує, що в ході формування нового технологічного устрою суспільства роль університетів, у яких наука є невід'ємною органічною складовою, суттєво змінюється: інжинірингова та комерційна діяльність університетів поступово стає нарівні з освітньою та науковою. Отже, на ринку праці ці університети перетворюються на великих роботодавців та задають стандарти сучасних інженерних компетенцій (Romanovskyi, 2012).

Вкрай важливим є також розуміння стрімкого та динамічного розвитку сучасної інженерної діяльності: дуже часто професії та спеціальності, затребувані під час перебування здобувачів вищої освіти абітурієнтами, перестають бути такими при виході на захист кваліфікаційної роботи. Тому метою інженерної педагогіки, поруч із інноваційною спрямованістю, є також і адаптивність інженерної освіти, тобто здатність випускників швидко набувати нові компетенції для продуктивної роботи з використанням нових засобів праці при оновленні функціоналу та більш серйозній трансформації інженерної діяльності. Саме цілям вирішення зазначеної проблемної ситуації може слугувати дана стаття.

Аналіз публікацій по темі дослідження. У професійному співтоваристві нині активно обговорюються роль та місце інженерної педагогіки в інженерній діяльності (див., наприклад, Kalna, 2012; Kirsanov & Kondratyev, 2010; Kuleshova & Malovana, 2009; Nychkalo, 2010; Pazynich & Bychko, 2009; Byvalkevych, 2018; Reheilo, 2014; Shcherbak, 2010; Holovan, 2014), висвітлюється її значущість для розвитку сучасної інженерної освіти. При всій винятковій важливості фундаменталізації інженерної освіти, розвитку у майбутніх інженерів системного мислення, адаптивності та необхідного набору компетенцій, сьогодні у фокусі інженерної педагогіки мають бути питання нової методології інженерної діяльності.

Метою даної роботи є розкриття таких методологічних компонентів інженерної педагогіки, як об'єкт та предмет, цілі та завдання, принципи, методи та організаційні форми навчання, засоби та результати навчання в контексті процесів науково-технічного пізнання та інженерної діяльності.

Виклад основного змісту дослідження. Професійна успішність учнів – фахівців-інженерів – змушує та мотивує до професійного зростання їх учителів – науково-педагогічних працівників закладів вищої освіти.

Інженерна педагогіка як професійна діяльність викладачів, що формують та розвивають необхідні майбутнім інженерам компетенції, націлена на те, щоб випускники закладів вищої освіти були конкурентоспроможними, ефективними в обраній ними інженерній діяльності та готовими брати активну участь у її інноваційному розвитку. Отже, інженерна педагогіка та інженерна діяльність об'єктивно пов'язані позитивним зворотним зв'язком через інженерну практику та забезпечуваний нею науково-технічний прогрес. При цьому очевидно, що інституційно встановлені рамки, в яких здійснюється інженерна та освітня діяльність і які визначаються цінностями, потребами, доступними ресурсами, включаючи людські, та чинним законодавством, здатні істотно впливати на цей зв'язок (рис. 1).



Рис. 1. Взаємозв'язок інженерної педагогіки та інженерної діяльності

Розглядаючи інженерну педагогіку у сучасному контексті пошуку адекватних інструментів створення якісного освітнього простору у закладах вищої освіти насамперед потрібно навести доречну історичну довідку. Поняття «інженерна педагогіка» було введено професором Клагенфуртського університету (Австрія) А. Мелецінеком, який видав книгу «Інженерна педагогіка: Практика передачі технічних знань» (Meletsinek, 2000) та заснував у 1972 році Міжнародне товариство з інженерної педагогіки – Internationale Gesellschaft für Ingenieurpädagogik, що є однією з найавторитетніших міжнародних організацій у сфері вищої технічної освіти. Поява інженерної педагогіки зумовлена необхідністю поєднання освіти, науки та бізнесу як системи, що визначає технологічний та економічний розвиток суспільства.

Інженерну педагогіку можна розглядати як методологічно фундаментальну систему із специфічним взаємозв'язком гуманітарного, природничо-наукового та прикладного знання на основі логіки інженерної діяльності. На відміну від традиційної, інженерна педагогіка висуває нові цінності освіти: компетенції (знання, вміння, навички, здібності), необхідні для виконання сучасної інженерної діяльності, розв'язання широкого кола інноваційних освітніх, науково-дослідних та виробничих завдань (Bakhtiarova, 2009). В аспекті інженерної освіти інженерна педагогіка може виступати педагогічною теорією системи підготовки інженерних та науково-педагогічних кадрів (мета, принципи, зміст освіти, методи, форми організації та засоби навчання), цілісною педагогічною теорією створення, функціонування та розвитку навчально-науково-інноваційних комплексів.

Об'єктом інженерної педагогіки є педагогічна система вищої інженерної освіти, її цілі, принципи,

форми організації, методи та засоби навчання; *предметом* – проектування змісту вищої інженерної освіти, процесу навчання та формування особистості майбутнього інженера.

Цілі інженерної освіти зумовлюються потребами наукоємних виробництв, науково-виробничих комплексів, конструкторських та проектних установ у спеціалістах нового типу, які повинні поєднувати функції наукового працівника, проектувальника, конструктора, винахідника, здатного на міжпредметній основі цілісно представляти досліджуваний об'єкт, бачити його системні зв'язки з іншими об'єктами. *Основні завдання інженерної педагогіки*:

- підвищення ефективності діяльності науково-педагогічних кадрів закладів вищої освіти, сприяння проникненню досягнень інженерної педагогіки у їх професійну діяльність;
- проведення педагогічних досліджень з актуальних практичних проблем інженерної діяльності, формування інженерного світогляду, інженерного мислення та інженерної культури сучасного інженера;
- дослідження та розробка організаційно-педагогічних заходів щодо вдосконалення системи розвитку інженерного мислення у майбутніх фахівців;
- покращення якості інженерної освіти через підвищення науково-педагогічного рівня викладання професійних дисциплін та впровадження нових педагогічних та інформаційних технологій;
- удосконалення методики викладання інженерно-технічних дисциплін, а також практичної підготовки студентів.

Відповідно до аналізованої методології інженерної педагогіки система підготовки сучасного інженера керується *загальнопедагогічними* (науковості, системності та послідовності, зв'язки навчання з життям, мотивації вчення та праці, активності та самостійності, наочності та абстрактності, індивідуалізації та диференціації навчання) та *специфічними принципами*. Серед загальнодидактичних особливу значимість має принцип науковості, оскільки зміни у науці та техніці безпосередньо впливають на обладнання, технології, організацію і зміст праці, а отже, і на зміст професійної освіти та технології навчання. *Специфічними принципами* інженерної педагогіки є:

- 1) динамічність – бачення сучасних та нових тенденцій, перспектив розвитку науки, техніки, виробництва та освіти;
- 2) системність – цілісне уявлення проєктованого та конструйованого технічного об'єкта, бачення його зв'язків з іншими об'єктами з метою виключення можливих негативних явищ та їх наслідків ще на етапі проєкування;
- 3) цілісність – відображення у змісті та процесі підготовки інженерів специфіки професійної діяльності та адекватного їй цілісного змісту цієї підготовки;
- 4) інтеграція та диференціація підготовки фахівців – орієнтація на інтегровані професії широкого профілю та на вузьку спеціалізацію;
- 5) професійна спрямованість – орієнтація змісту освіти, методів та форм навчання на кінцеву мету підготовки фахівця;

6) наступність – відображення минулого, сьогодення та майбутнього у змісті освіти, методах та формах організації навчання, зв'язок освітнього процесу з майбутньою професійною діяльністю тощо.

Сьогодні колишні уявлення про *зміст освіти*, орієнтованої переважно на вузькопрофесійну підготовку фахівців, вступили в суперечність із потребами суспільства. Основним завданням освіти нині стає не просте передавання готових знань, а підготовка здобувачів освіти до практичної діяльності, формування в них професійних компетенцій. Новий зміст інженерної освіти, заснований на комплексі компетенцій, передбачає фундаментальні та технічні знання, уміння аналізувати та вирішувати проблеми з використанням міждисциплінарного підходу, готовність до комунікацій та командної роботи.

Специфіка *методів теоретичного та практичного навчання* здобувачів вищої освіти обумовлена особливостями природничих, загальнотехнічних, спеціальних предметів, що вивчаються, і сфери майбутньої професійної діяльності. Різноманітність методів навчання та їх специфіку обумовлюють функції, що виконуються інженером, і відповідні професійні вміння: *проектувальні* (створення інженерно-технічних систем, об'єктів, поточне та перспективне планування професійної діяльності, проектування систем управління та контролю), *конструктивні* (виконання ескізів, креслень на виготовлення виробів, ведення технологічного процесу відповідно до технічних умов, визначення системи заходів для усунення несправностей) та *гностичні* (читання технічних ескізів, креслень, виявлення можливостей та умов).

Результативність навчання визначається як змістом і методами, так і *формами організації навчання*. Модернізований зміст освіти, інтеграція науки, виробництва та освіти стимулює появу нових форм організації навчання в умовах виробництва, де здобувачі вищої освіти виконують практичні завдання по проектуванню, конструюванню, розробці та експлуатації реальних інженерних систем. Для підвищення якості інженерної освіти важливе значення також має створення та впровадження у освітній процес сучасних *засобів навчання*, до специфічних принципів продуктивного використання яких у навчальному процесі можна віднести: комплексність, необхідність, доцільність та оптимальність, інтеграцію та диференціацію навчальної інформації, варіативність та альтернативність тощо.

Серед орієнтирів інженерної педагогіки розрізняють процеси науково-технічного пізнання та інженерну діяльність. *Науково-технічне пізнання* – це процес оволодіння студентами об'єктивно чи суб'єктивно новими технічними та технологічними знаннями у галузі науки, техніки, виробництва, способами діяльності, передбачення перспектив їх розвитку. Специфіка науково-технічного пізнання обумовлена особливостями предмета відображення – технічних об'єктів та технологічних процесів. *Інженерна діяльність* – це динамічна система взаємодії інженера та знарядь, механізмів, споруд, які

необхідно побудувати штучним шляхом, спираючись на наукові знання, уміння, навички та інженерні здібності. Інженерна діяльність утворює замкнутий цикл: проектування, конструювання, організація виготовлення та впровадження інженерних об'єктів, їх експлуатація.

Все це характеризує інженерну педагогіку як фундаментальну та прикладну науку, науковий статус понять та категорій якої є методологічною основою вирішення багатьох проблем підготовки сучасних інженерних кадрів та науково-педагогічних кадрів закладів вищої освіти.

Принципові зміни в інженерній освіті, нові форми інтеграції науки, освіти і виробництва, потреба у фахівцях з високим рівнем професійної компетентності викликали відповідні зміни в системі підготовки та підвищення кваліфікації науково-педагогічних кадрів закладів вищої освіти. При цьому варто керуватися наступними концептуальними положеннями:

1. Професійну компетентність викладача визначають фундаментальна інженерна підготовка з урахуванням сучасних новацій у системі професійної освіти та професійно спрямована психолого-педагогічна підготовка.

2. Мета підготовки та підвищенні кваліфікації науково-педагогічних кадрів виходить із загальної мети інженерної освіти, мети та завдань програми розвитку закладу вищої освіти, його пріоритетних напрямів розвитку.

3. Професійно-педагогічна підготовка має бути системною, спрямованою на конкретні види педагогічної діяльності й задачі підготовки майбутнього фахівця.

4. Система педагогічних компетенцій є основним показником діяльності сучасного викладача.

5. В основі функціонування та розвитку системи підготовки та підвищення кваліфікації викладачів лежить принцип відповідності системи змінам, що відбуваються у науці, техніці, технологіях та, відповідно, у професійній діяльності інженера та професійно-педагогічній діяльності викладача.

6. В основу змісту професійно-педагогічної підготовки викладачів покладено ідею інтеграції різних областей знання, які входять у поле їх професійної діяльності, що забезпечує засвоєння системних знань та розвиток системного мислення.

Висновки. Резюмуючи вищевикладене, можна сказати, що сьогодні інженерна педагогіка постає перед нами як самостійна галузь наукового знання, яка за рахунок взаємодії з технічними науками і технікою педагогічно впливає на розвиток особистості здобувача вищої освіти, створює умови для формування багатогранної особистості інженера. Поряд з цим, сучасна парадигма вищої освіти зумовлює необхідність спеціальної підготовки викладацьких кадрів, що інтегрує технічні, технологічні та людинознавчі знання в галузі педагогіки та психології та відповідає вимогам інженерно-педагогічної діяльності. Очевидно, що така підготовка науково-педагогічних кадрів, як і інженерна підготовка, потребують подальшого розвитку методології та теорії.

Бібліографічні посилання:

1. Bakhtiarova, Kh. Sh. (2009). Metodolohichni pryntsypy bahatorivnevoi pidhotovky maibutnikh inzheneriv-pedahohiv u tekhnichnomu universyteti [Methodological principles of multi-level training of future engineers-pedagogues at the technical university]. *Naukovi zapysky NaUKMA: pedahohichni, psykhologichni nauky ta sotsialna robota*. Kyiv, *Ahrar Media Hrup*, 97, 16–19 (in Ukrainian).
2. Byvalkevych, L. M. (2018). Shliakhy udoskonalennia inzhenerno-pedahohichnoi osvity v konteksti reformuvannia osvitnoi haluzi [The way to improve engineering and pedagogical education in the context of reforming the educational sector]. *Visnyk: Pedahohichni nauky*, 155, 11–14 (in Ukrainian).
3. Holovan, M. S. (2014). Profesiina kompetentnist vykladacha vyshchoho navchalnoho zakladu [Professional competence of a teacher of a higher education institution]. *Problemy suchasnoi pedahohichnoi osvity. Seriya: Pedahohika i psykhohihiia*, Yalta: RVV KHU, 44 (3), 79–88 (in Ukrainian).
4. Kalna, T. H. (2012). Pedahohichna aksiolohiia v umovakh modernizatsii profesiinopedahohichnoi osvity [Pedagogical axiology in the conditions of modernization of vocational education]. Kyiv, Vyd-vo NPU im. M. P. Drahomanova, 128 (in Ukrainian).
5. Kirsanov, A. A., Kondratyev, V. V. (2010). Engineering pedagogy: definitions, problems, levels and functions. Diversity unifies – Diversity in Engineering Education, Trnava, Slovakia, 206–208.
6. Kuleshova, V. V., Malovana, V. V. (2009). Osoblyvosti pidhotovky maibutnikh inzheneriv-pedahohiv u vyshchomu navchalnomu zakladi [Peculiarities of training future engineer-pedagogues in a higher educational institution]. *Problemy inzheneropedahohichnoi osvity*, 22/23, 149–156 (in Ukrainian).
7. Meletsinek, A. (2000). Engineering pedagogy. Practice of transfer of technical knowledge. Niu York, Springer Wien, 239.
8. Nychkalo, N. H. (2010). Profesiina pedahohika i pedahohika pratsi: problemy vzaiemozviazku v umovakh rynkovoi ekonomiky [Professional pedagogy and labor pedagogy: problems of interconnection in the market economy]. *Pedahohika i psykhohihiia*, 2, 33–45 (in Ukrainian).
9. Pazynich, Yu., Bychko, O. (2009). Rol inzhenernoi pedahohiky v suchasni osviti [The role of engineering pedagogy in modern education]. *Visnyk NTUU "KPI"*, 3 (27), ch. 2, 165–167 (in Ukrainian).
10. Reheilo, I. Yu. (2014). Pidhotovka naukovykh i nauково-pedahohichnykh kadriv vyshchoi kvalifikatsii Ukrainy u XX – na pochatku XXI stolittia [Preparation of scientific and scientific-pedagogical staff of the highest qualification of Ukraine in the XX – beginning of the XXI century]. Kyiv, *Osvita Ukrainy*, 704 (in Ukrainian).
11. Romanovskiy, O. O. (2012). Fenomen pidpriemnytstva v universytetakh svitu [The phenomenon of entrepreneurship in the universities of the world]. Vinnytsia, Nova knyha, 503 (in Ukrainian).
12. Shcherbak, O. I. (2010). Profesiino-pedahohichna osvita: teoriia i praktyka [Professional and pedagogical education: theory and practice]. Kyiv, *Naukovyi svit*, 279 (in Ukrainian).

Khursenko S. M., Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Sumy National Agrarian University, Sumy, Ukraine

Engineering pedagogy in the training of engineers and scientific and teaching staff of institutions of higher education

High-quality engineering education is one of the determining factors in the technological development of modern society. Continuous development of engineering activity – its modernization, improvement, expansion into other spheres of activity – requires adjustment, updating of goals, means and methodology of educational activity in general and engineering pedagogy in particular. In the professional community, the role and place of engineering pedagogy in engineering activity is currently being actively discussed, its significance for the development of modern engineering education is highlighted. Engineering pedagogy is aimed at ensuring that graduates of higher education institutions are effective in their chosen engineering activity, competitive, and ready to take an active part in its innovative development. With all the exceptional importance of the fundamentalization of engineering education, the development of future engineers' system thinking, adaptability and the necessary set of competencies, today the focus of engineering pedagogy should be the issues of a new methodology of engineering activity.

Today, engineering pedagogy appears before us as an independent branch of scientific knowledge, which, due to interaction with technical sciences and technology, pedagogically influences the development of the personality of a student of higher education, creates conditions for the formation of a multifaceted personality of an engineer. Along with this, the modern paradigm of higher education requires special training of teaching staff, which integrates technical, technological and humanistic knowledge in the field of pedagogy and psychology and meets the requirements of engineering and pedagogical activity. It is obvious that such training of scientific and pedagogical personnel, as well as engineering training, require further development of methodology and theory.

The article examines such methodological components of engineering pedagogy as object and subject, goals and tasks, principles, methods and organizational forms of education, means and results of education in the context of the processes of scientific and technical knowledge and engineering activity. The subject of studying engineering pedagogy, its general didactic and special principles have been specified from today's standpoint. The orientations of engineering pedagogy are considered: the processes of scientific and technical knowledge and engineering activity.

Key words: pedagogy, engineering, engineering pedagogy, engineering activity, adaptability, methodology, principles, forms of education.

НОТАТКИ