

Київський національний університет
технологій та дизайну

МОНОГРАФІЯ

Інноваційні матеріали та технології:
**БІОТЕХНОЛОГІЯ,
ПРИКЛАДНА ХІМІЯ,
ЕКОЛОГІЯ**

ТОМ II



Київ 2025

Ministry of Education and Science of Ukraine

Kyiv National University of Technologies and Design
Faculty of Chemical and Biopharmaceutical Technologies

**ADVANCED MATERIALS AND TECHNOLOGIES:
BIOTECHNOLOGY, APPLIED CHEMISTRY,
ECOLOGY**

Volume II

MONOGRAPH

2025

УДК 001.895-03:[608.32:502.131.1:54-027.22

I-66

Рецензенти:

Бессарабов Володимир Іванович – д-р техн. наук, проф., директор Інституту фізико-органічної хімії і вуглехімії ім. Л. М. Литвиненка НАН України;

Мережко Ніна Василівна – д-р техн. наук, проф., завідувач кафедри товарознавства та митної справи Державного торговельно-економічного університету.

Рекомендовано до видання

Вченою радою Київського національного університету

технологій та дизайну

(Протокол № 5 від 23 грудня 2025 р.)

I-66 Інноваційні матеріали та технології: біотехнологія, прикладна хімія, екологія: моногр. Т. 2 / за заг. ред. Мокроусової О. Р., Плаван В. П., Київ: КНУТД, 2025. 340 с.

ISBN 978-617-7763-61-0

У колективній монографії представлено результати сучасних наукових пошуків та практичні здобутки у сферах біотехнологій, хімічної інженерії та екологічної безпеки. Книга орієнтована на широке коло фахівців – від студентів профільних спеціальностей до досвідчених науковців та галузевих експертів.

УДК 001.895-03:[608.32:502.131.1:54-027.22

Публікується в авторській редакції

ISBN 978-617-7763-61-0

© О. Р. Мокроусова, В. П. Плаван, 2025

© КНУТД 2025

UDC 001.895-03:[608.32:502.131.1:54-027.22

I-66

Reviewers:

Volodymyr Bessarabov – Doctor of technical sciences, Professor, Director of the L.M. Lytvynenko Institute of Physical-Organic and Coal Chemistry;

Nina Merezhko – Doctor of Sciences, Professor, Head of the Department of Commodity Science and Customs Affairs of State University Of Trade And Economics.

Recommended for publication

*By the Academic Council of Kyiv National University
of Technologies and design of Ministry of Education and Science of Ukraine
(Protocol № 5 dated December 23 2025)*

I-66 Advanced materials and technologies: biotechnology, applied chemistry, ecology: monograph. Vol. 2; edited by Mokrousova O. R., Plavan V. P., Kyiv: KNUTD, 2025. 340 p.

ISBN 978-617-7763-61-0

This collective monograph presents the results of contemporary scientific research and practical achievements in the fields of biotechnology, chemical engineering, and environmental safety. The book is intended for a wide range of specialists, from students in relevant fields to experienced scientists and industry experts

UDC 001.895-03:[608.32:502.131.1:54-027.22

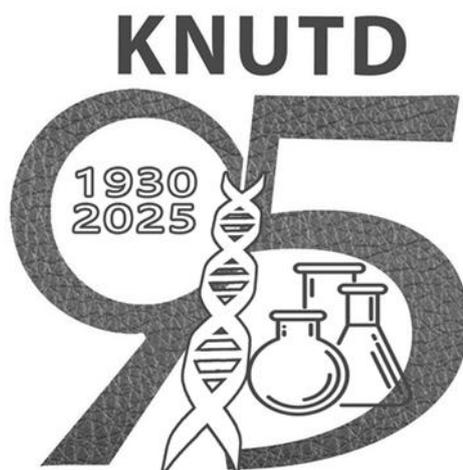
Published in the author's version

ISBN 978-617-7763-61-0

© O. R. Mokrousova, V. P. Plavan, 2025

© KNUTD, 2025

РОЗДІЛ 2
ПРИКЛАДНА ХІМІЯ



2.1 SPECTRAL ANALYSIS OF THE STRUCTURING PROCESS OF EPOXY-OLIGOESTER COMPOSITIONS

N. Chopyk, V. Zemke, M. Bratychak

Lviv Polytechnic National University, Ukraine,
mbratych@gmail.com

The work focuses on the formation of epoxy-oligoester compositions and the mechanisms behind their hardening. These mechanisms are based on industrial epoxy resin ED-20 and oligoester acrylate TGM-3. ED-20P resin modified with tert-butyl hydroperoxide was used as an initiator. Spectral analysis identified peroxide groups in the structure of ED-20P. It was determined that these fragments are thermosensitive and that, with increasing temperature, highly active free radicals are formed, which are the driving force for the formation of the grid structure of the oligomer.

Keywords: epoxy-oligoester, spectral analysis, initiator, structuring.

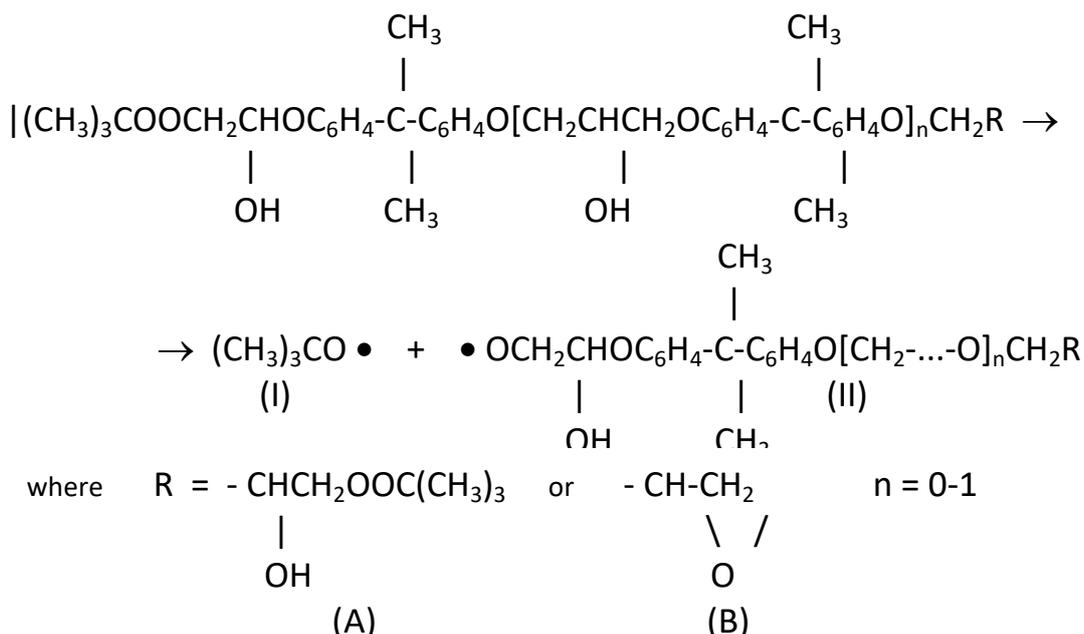
Epoxy resins are a type of thermosetting polymer that has certain unique properties during the production process. These include a low-pressure requirement for manufacturing products, very low shrinkage during the curing stage, and low residual stresses. The ability to use them over a wide temperature range with the appropriate hardener allows you to adjust the level of crosslinking and structure formation. By influencing these processes, we can adjust the working properties of the composites. Epoxy resins have a variety of uses, including as structural adhesives, surface coatings, engineering composites and electrical insulation. [1, 2]. The combination of epoxy resins with oligoesters is carried out for two reasons: to reduce the cost of materials based on epoxy and to improve their properties. [3].

Polyesters usually serve as plasticizers for epoxy compositions and are therefore not chemically bonded to the polymer network of the epoxy oligomer. However, such plasticization of epoxy compositions, despite the fact that it allows to reduce the fragility of products, in general does not improve their performance properties. This is due to the fact that, as the polyester is not chemically bonded to the epoxy resin molecules, it «sweats» during the operation of the polymer material, thereby leading to a deterioration in its properties [4].

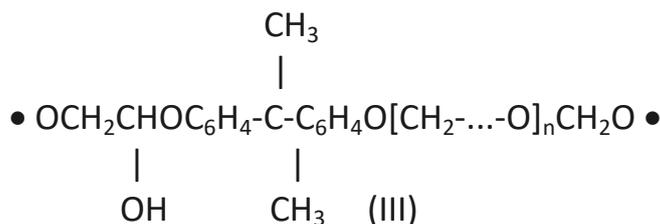
This work studies the possibility of forming epoxy-oligoester compositions based on industrial epoxy resin ED-20 and oligoester acrylate TGM-3, which belong to the class of hybrid oligomeric systems and are of considerable interest in polymer chemistry due to the possibility of combining high mechanical properties of the epoxy matrix with increased curing speed and elasticity of acrylate polymers [5].

As ED-20 and TGM-3 have incompatible polymerization mechanisms, a specific initiator is required for optimal crosslinking: the ED-20P resin modified

with tert-butyl hydroperoxide. The ED-20P resin molecule contains labile peroxide groups that decompose when heated to 373 K, forming free radicals.



In time, oligoradical (II) in which R = (A) also decomposes with the formation of radical (I) and biradical (III), in the form of:



The process of radical polymerization of unsaturated compounds can be initiated by free radicals (I), (II) and (III) that are formed during heating.

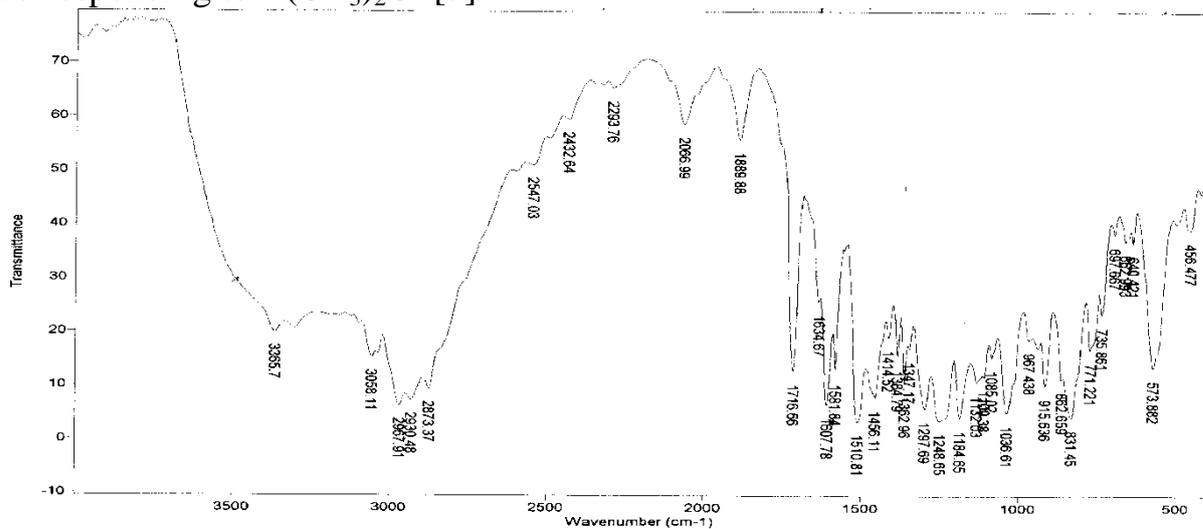
The formed radicals in the case of oligoesteracrylate's presence in the system will cause their three-dimensional polymerization. Oligoradical (II) contains a free radical at one end, and an epoxy group at the other. Radical (III) is a biradical.

The existence of a modified epoxide in such an epoxy-oligoester composition containing peroxide groups, which can act as a source of free radicals, will result in the formation of a spatially cross-linked oligomer.

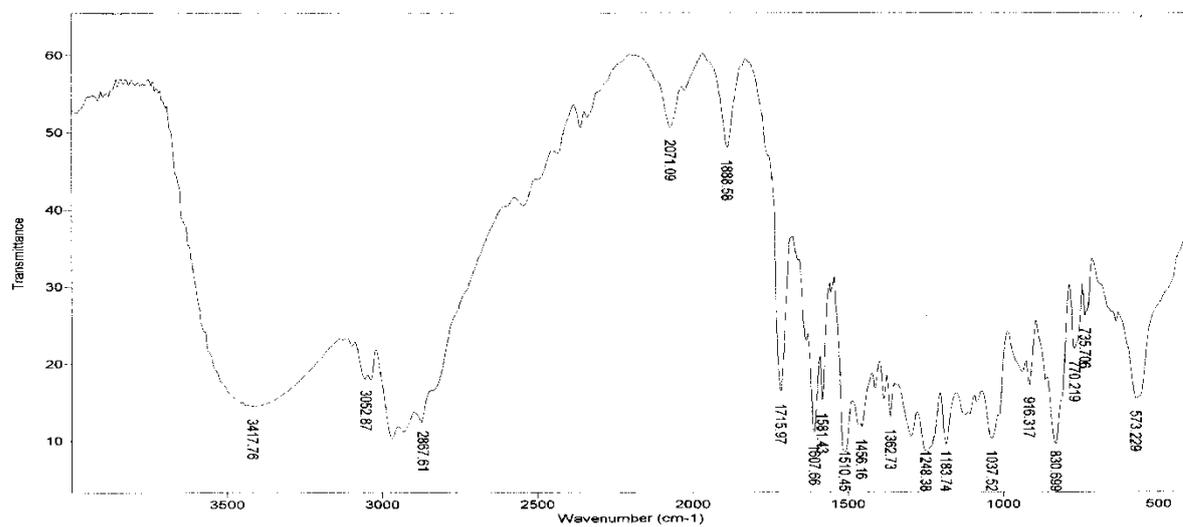
IR spectroscopic studies were conducted to study the process of forming spatially cross-linked structures. The following compositions: ED-20 - 70 wt %, peroxide resin ED-20P - 30 wt %, oligoester THM-3 - 16 wt %, PEPA - 14 wt % have been used [6].

The composition of epoxy resin ED-20, peroxide resin ED-20P, oligoester THM-3 and PEPA was identified by recording their spectra separately. The spectrum of ED-20 resin showed absorption bands at 915 cm⁻¹, which are characteristic of valence vibrations of the epoxy ring. The presence of a hydroxyl group is proven by the absorption band at 3501 cm⁻¹. The presence of the CH₃-C-CH₃ fragment in the molecule is confirmed by absorption bands at

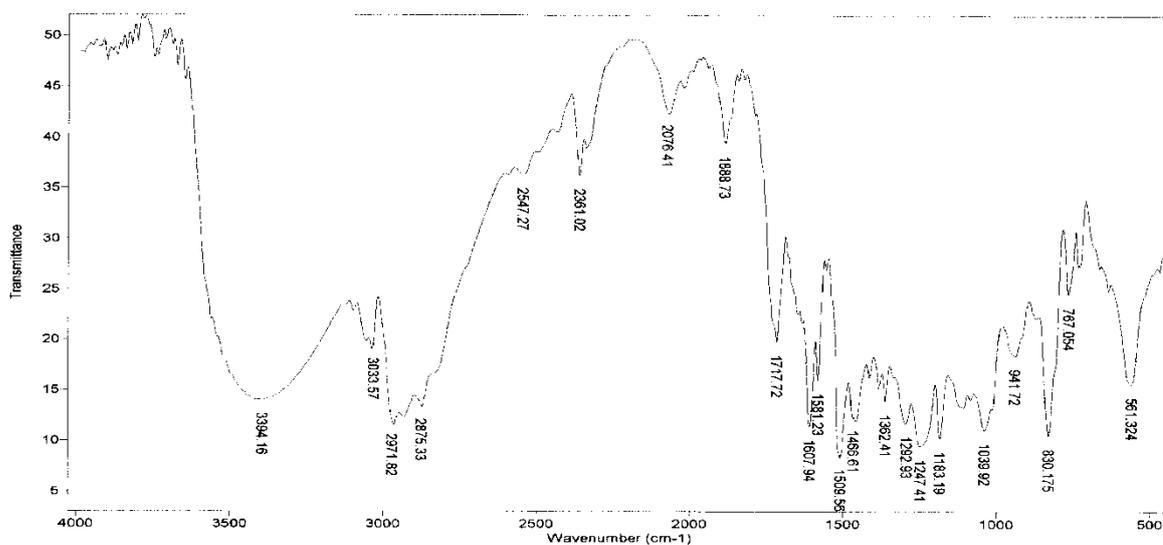
1455 and 1429 cm^{-1} as well as the deformation vibrations at 1385 and 1362 cm^{-1} corresponding to $\text{R}(\text{CH}_3)_2\text{C}$ - [7].



A



B



C

Fig. 1. IR spectra of the composition before structuring (A), structuring within 24 hours at 293K (B), structuring within 80 min. at 403 K (C)

An absorption band at 916 cm^{-1} was found in the ED-20P epoxy resin modified with tert-butyl hydroperoxide, which has a much lower intensity than the same band in the ED-20 resin. In other words, this fact confirms the presence of residual epoxy bands in the modified ED-20P.

At the same time, an intense absorption band appears at 3434 cm^{-1} , which is characteristic of the valence vibrations of the hydroxyl group. The formation of a hydroxyl group was the result of the opening of the epoxy ring and the linking of a tert-butyl hydroperoxide fragment to it. It is known from literature sources that the -O-O- bond does not show itself clearly in the IR spectra [7, 8]. Grounding on the ED-20P resin spectrum, it can be seen that the valence vibrations of the peroxide group are not clearly appeared at 880 cm^{-1} . This band is not present in the ED-20 resin spectrum. Nevertheless, the existence of peroxide fragments in the ED-20P resin can be proven by a more intense doublet of heme-dimethyl deformation vibrations at $1384, 1362\text{ cm}^{-1}$, which belongs to the $(\text{CH}_3)_3\text{C-}$ group.

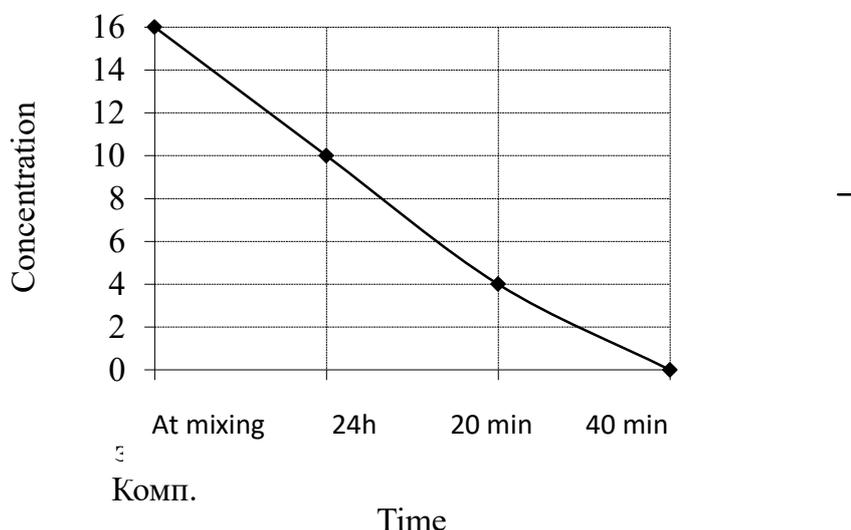


Fig. 2. Change in the concentration of epoxy groups during structuring

The presence of double bonds in oligomeric acrylates can be identified by a vibration band at $1719\text{--}1718\text{ cm}^{-1}$, which is characteristic of the valence vibrations of the carbonyl group in the ester bond linked to the double bond ($-\text{O}-\text{C}(\text{O})-\text{C}=\text{CH}_2$) [6, 7]. As shown in Fig.1, the composition's spectra before and after structuring within 24 hours at room temperature under heating to 403 K (80 minutes) are not the same. As can be seen from Fig.1A, the composition contains absorption bands at 916 cm^{-1} , which are characteristic of the epoxy group. A doublet of deformation vibrations is also observed at $1385\text{ cm}^{-1}, 1363\text{ cm}^{-1}$, indicating a fragment of the peroxide group, and at 1718 cm^{-1} , indicating valence vibrations of the carbonyl group in the unsaturated group. After holding the film at room temperature for 24 hours, the intensity of the epoxy group band decreases (Fig.2). Furthermore, the concentration of epoxy groups when such films are heated to 403 K reaches zero (Fig.1.C and 2). At the same time as the epoxy groups are reduced during the structuring process of such a composition,

the absorption band at 3394 cm^{-1} , which is associated with the valence vibrations of the hydroxyl group, grows. Concurrently, as evidenced by Figure 1, during the process of film formation, there is a decline in the intensity of the absorption band at 1718 cm^{-1} , which, in this instance, is responsible for the reduction of unsaturated bonds. The change in the concentration of mentioned group is shown in Fig. 3.

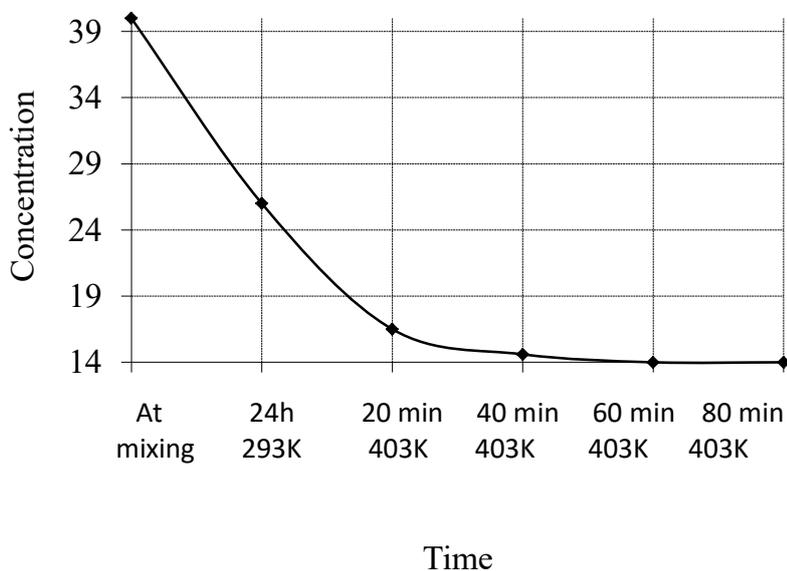


Fig. 3. Change in the concentration of carbonyl groups in the process of structuring

The analysis of the spectra specified in Fig.1 shows that upon thermal heating of the composition, an oscillation band appears at 941 cm^{-1} , which characterizes the ether bond. In the spectrum (Fig.1.A), such a band is absent and appears only during the structuring of such compositions during heating (Fig. 4).

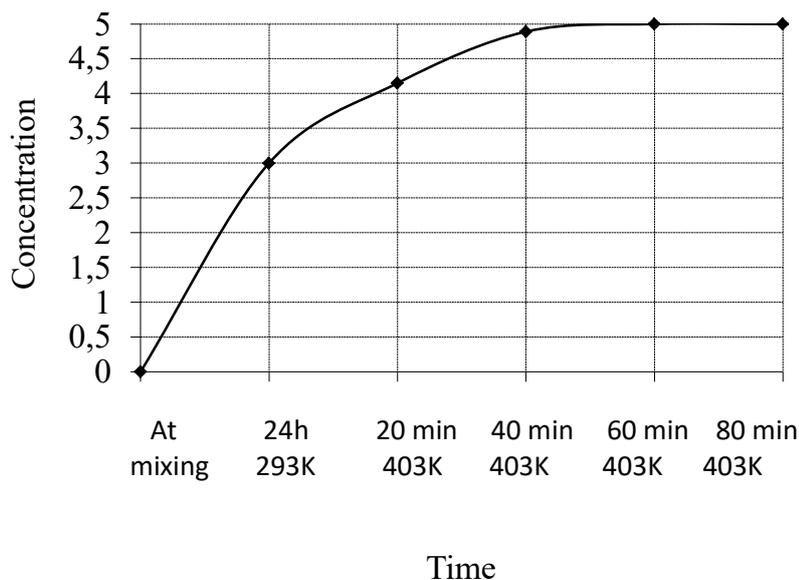
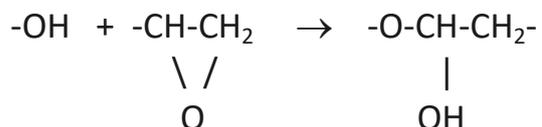


Fig. 4. Change in the concentration of ether bonds during the structuring

Fig. 4 shows a decrease in the intensity of the absorption band at 916 cm^{-1} , as well as the appearance of an absorption band at 3418 cm^{-1} , (Fig.1.B) the presence of hydroxyl groups is indicative of an interaction between the epoxy groups of ED-20 resin and ED-20P with PEPA at room temperature. The intensity of the epoxy group remains virtually unchanged when such films are heated. The decrease in the intensity of the absorption bands at $1385\text{-}1363\text{ cm}^{-1}$, characterizing the $(\text{CH}_3)_3\text{C}$ group, and at 1718 cm^{-1} , related to the valence vibrations of the carbonyl group in the ester bond contained in the unsaturated TGM-3 oligoester fragment. The above proves the involvement of the aforementioned groups of peroxide and double bonds in structuring processes. (Fig. 4).

Ether bonds are formed as a result of reactions occurring at 403 K, in addition to the radical processes. This is defined by the absence of an absorption band at 914 cm^{-1} in the spectrum of the composition before structuring (Fig.1.A) and its appearance upon heating (Fig.1.C, Fig.4). We can explain the formation of an ether bond by the chemical interaction of hydroxyl groups formed at the first stage of structuring with epoxy groups, according to the following equation:



According to the given equation, the reaction at 403 K causes an ether bond to form and does not change the total concentration of hydroxyl groups in the mixture.

Conclusions. Through IR spectroscopic studies it was determined that the structuring of polymer compositions containing industrial epoxy resin ED-20 modified with epoxy resin ED-20P, oligoester acrylate TGM-3 and polyethylene-polyamine (PEPA) is due to the interaction of groups of ED-20 and ED-20P with PEPA. At the same time, peroxide groups in ED-20P resin are decomposed with the formation of free radicals, which cause three-dimensional polymerization of TGM-3 oligoester acrylate.

The results obtained demonstrate the involvement of epoxy groups from the ED-20 and ED-20P resins, as well as the oligoester TGM-3, in the reactions that lead to the formation of three-dimensional structures. The absorption bands at $1719\text{-}1718\text{ cm}^{-1}$ and $1385\text{-}1363\text{ cm}^{-1}$ are less intense in the process of structuring the composition at room temperature. This indicates that crosslinks are formed not only due to the interaction of epoxy groups with PEPA, but also as a result of double bonds polymerization in the oligoester. At higher temperatures (403 K), as well as the three-dimensional formation of the oligoester, other reactions take place that lead to the creation of ether bonds. These bonds increase the gel fraction.

REFERENCES

1. Mi, X., Liang, N., Xu, H., Wu, J., Jiang, Y., Nie, B., & Zhang, Z. (2022). Toughness and its mechanisms in epoxy resins. *Progress in Materials Science*, 130, 100977.
2. Meng, X., He, Q., & Hryhorenko, T. (2025). Synthesis and Modifying Effect of

Oligoesters with Reactive Groups Based on Epoxy Aliphatic Resin and Oligoester Dicarboxylic Acids. *Polymers*, 17(4), 433.

3. Klein, T.; Fonseca, C.; Romanzinz, D.; Bianchi, O.; Amico, S. C. Thermal, rheological and mechanical properties of epoxy resin formulations. Proceedings of the 17th Brazilian Conference, Joinville-SC, Brazil, October 29-November 02, 2023.

4. Guen-Geffroy, A.; Gac, P.-Y.; Habert, B.; Davies, P. (2019). Physical ageing of epoxy in a wet environment: Coupling between plasticization and physical ageing. *Polymer Degradation and Stability*, 168, 108947.

5. Sukanto, H., Raharjo, W. W., Ariawan, D., Triyono, J., & Kaavesina, M. (2021). Epoxy resins thermosetting for mechanical engineering. *Open Engineering*, 11(1), 797–814.

6. Bratychak, M., Bashta, B., Astakhova, O., Shyshchak, O., & Zubal, O. (2019). Synthesis Mechanism and Properties of Epoxy Resins Modified with Adipic Acid. *Chemistry & Chemical Technology*, 13(1), 52–58.

7. Bratychak, M.; Brostow, W., Iatsyshyn, O.; Shyshchak, O. (2016). Reactive oligomers based on a cyanuric epoxy resin. *Materials Research Innovations*, 20, 479–485.

8. Fu, K.; Xie, Q.; Song, J.; Xia, G. (2024) Study on the Construction Method of Epoxy Resin Crosslinking Model. In: Electrical Materials. Engineering Materials, Xie, Q. Ed.; Springer, 2024.

2.2 THE ROLE OF MACHINE LEARNING TECHNOLOGIES IN POLYMER RESEARCH

Dmytro Novak

Kyiv National University of Technologies and Design

novak.ds@knutd.edu.ua

Machine learning technologies have revolutionized polymer research by enabling rapid prediction of material properties, accelerating the discovery of new polymers, and optimizing synthesis processes. This paper examines the integration of artificial intelligence methods in polymer science, including neural networks for property prediction, reinforcement learning for process optimization, and data-driven approaches for materials discovery. These technologies reduce experimental time and costs while expanding the accessible chemical space for polymer development.

Keywords: *machine learning, polymer science, Python, artificial neural networks, properties prediction.*

The development of new polymer materials traditionally relies on extensive experimental work that requires significant time and resources. Machine learning technologies offer transformative opportunities to accelerate polymer research by learning patterns from existing data and making predictions about unexplored chemical spaces. This research aims to analyze the current state and future potential of machine learning applications in polymer science. The object of this study encompasses computational methods applied to polymer property prediction, synthesis optimization, and materials discovery. The subject focuses on machine learning algorithms and their integration into polymer research workflows.

The polymer industry faces increasing demands for materials with tailored properties for specific applications, ranging from biodegradable packaging to high-performance aerospace components. Traditional trial-and-error approaches to polymer development can take years and consume substantial resources. Machine learning offers a paradigm shift by enabling researchers to explore vast chemical spaces computationally before conducting physical experiments [1]. This computational-first approach can potentially reduce development cycles from years to months while expanding the diversity of accessible polymer architectures.

Recent advances in computing power, algorithm development, and data availability have created an environment where machine learning can be effectively applied to polymer science [2].

Large databases of polymer properties and sophisticated neural network architectures enable accurate predictions of material characteristics based on molecular structure. These predictions guide experimental efforts toward the most promising candidates, significantly improving the efficiency of materials discovery programs.

Methods and Materials

This review synthesizes current literature on machine learning applications in polymer research, analyzing methodologies from over one hundred peer-reviewed publications spanning the past decade. The analysis focuses on three primary application areas: property prediction using supervised learning, process optimization through reinforcement learning, and materials discovery via generative models.

We developed a representative workflow using the Python programming language with standard machine learning libraries to demonstrate practical implementation. The implementation provides researchers with a template for applying these techniques to their polymer datasets. The complete machine learning workflow for polymer research is illustrated in Figure 1, showing the iterative cycle from data collection through experimental validation.

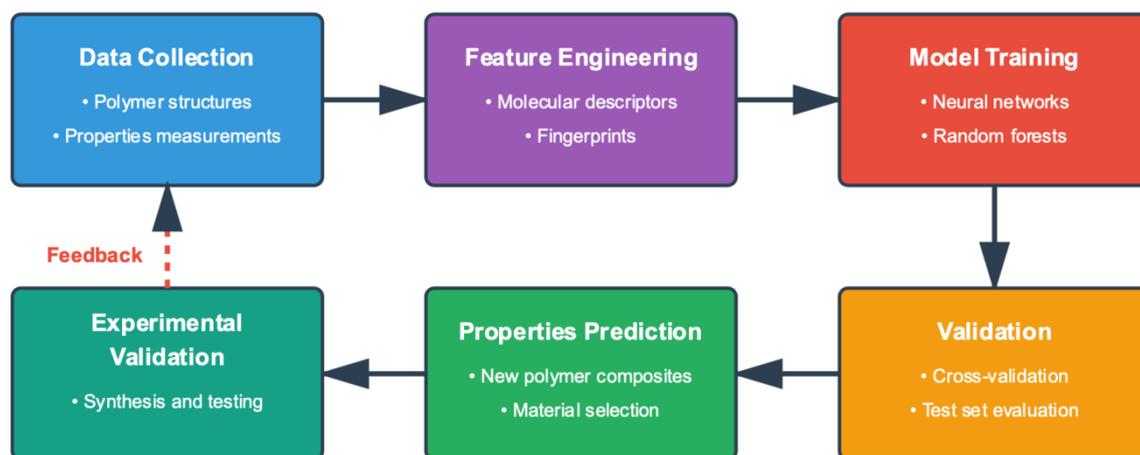


Fig. 1. Machine learning workflow in polymer research.

Supervised learning approaches typically employ artificial neural networks, random forests, or support vector machines trained on datasets linking polymer structures to their properties. These models learn mathematical relationships between molecular descriptors and target properties such as glass transition temperature, mechanical strength, or thermal conductivity. The training process involves presenting the algorithm with known structure-property pairs, allowing it to identify patterns that generalize to unseen polymers. A complete Python implementation demonstrating this workflow has been developed. It is available as supplementary material (see Supplementary Code), including modules for feature extraction from molecular structures, model training using neural networks and random forests, cross-validation procedures, and prediction capabilities for novel polymer candidates. The architecture of a typical neural network used for polymer property prediction is shown in Figure 2, depicting the input layer receiving molecular descriptors, hidden layers performing non-linear transformations, and the output layer producing property predictions.

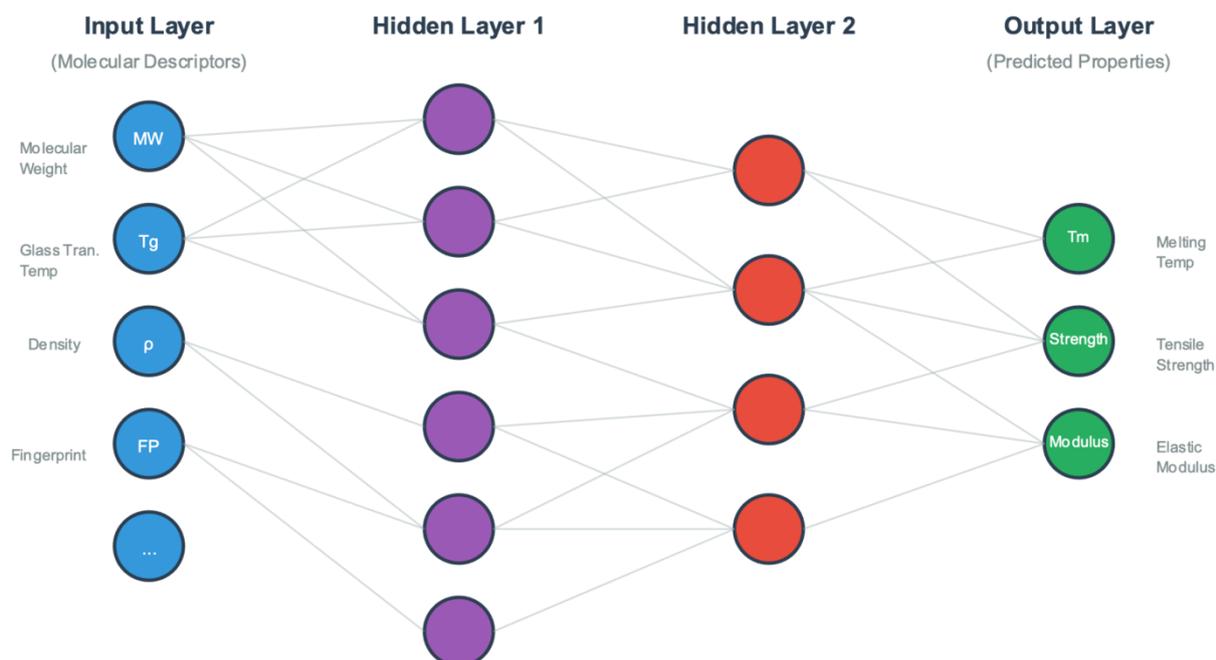


Fig. 2. Neural network architecture for polymer properties prediction.

Reinforcement learning methods optimize polymer synthesis processes by treating experimental conditions as actions in an environment where the goal is to maximize a reward function representing desired outcomes. The algorithm learns through trial and error, gradually improving its strategy for selecting reaction conditions, monomer ratios, and processing parameters. This approach proves particularly valuable for complex multi-step syntheses where traditional optimization methods struggle.

Generative models, including variational autoencoders and generative adversarial networks, create novel polymer structures by learning the underlying distribution of known polymers. These models can generate thousands of candidate structures that maintain chemical validity while exploring regions of chemical space not represented in training data. Researchers then screen these candidates computationally or experimentally to identify materials with desired properties.

Results

The application of machine learning to polymer property prediction has demonstrated remarkable accuracy across numerous properties [3]. Neural network models trained on databases containing thousands of polymers can predict glass transition temperatures with mean absolute errors below five degrees Celsius, representing accuracy sufficient for practical materials selection. Similarly, models predicting mechanical properties such as tensile strength and elastic modulus achieve correlations exceeding 0.9 with experimental values.

In documented case studies, process optimization using reinforcement learning has reduced development time for polymer synthesis protocols by up to seventy percent. One notable example involved optimizing the synthesis of block copolymers, where the algorithm identified reaction conditions producing materials with narrower molecular weight distributions and more precise block

compositions compared to traditional optimization approaches. The learning process required fewer experimental iterations than conventional design-of-experiments methods, demonstrating both time and cost savings. A comprehensive comparison of traditional versus machine learning-assisted polymer discovery approaches is presented in Figure 3, highlighting the significant improvements in both time efficiency and success rates achieved through ML integration.

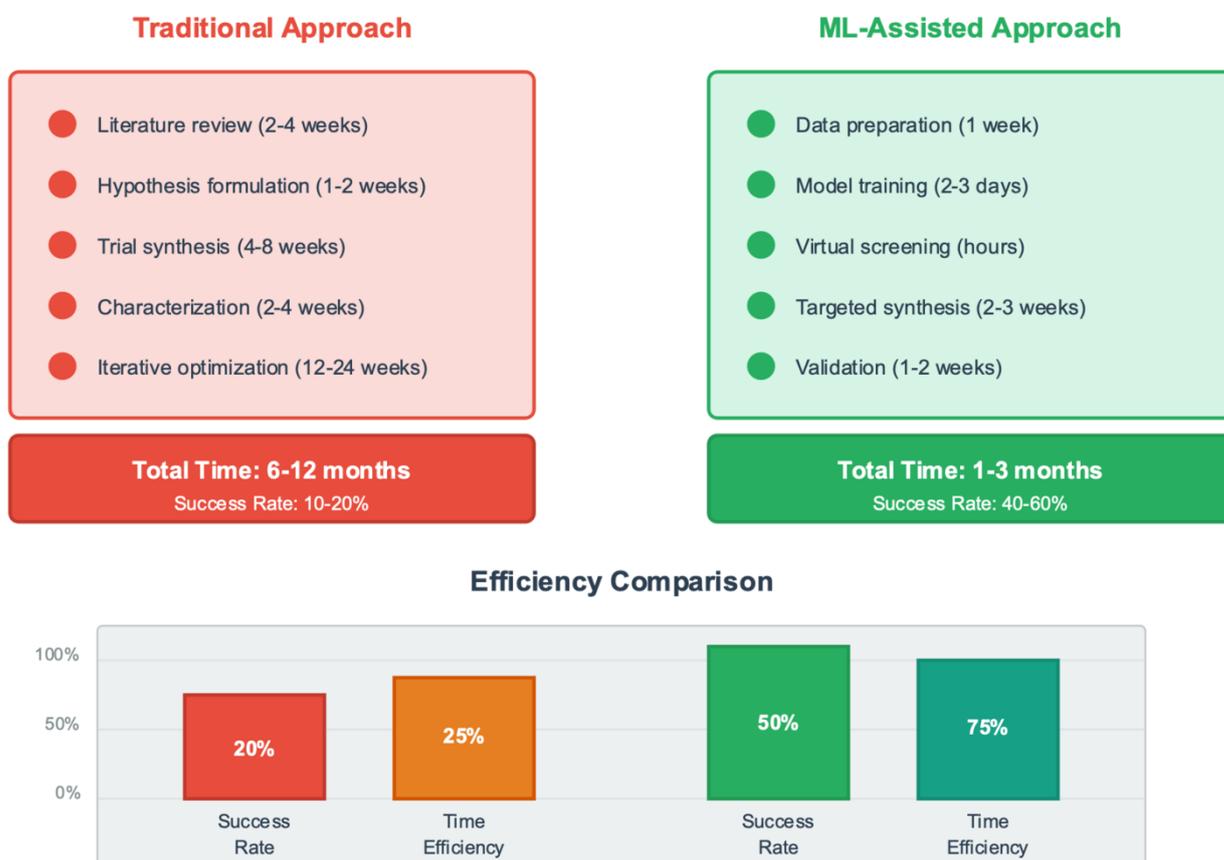


Fig. 3. Traditional vs ML-assisted approach.

Generative models have expanded the accessible chemical space for polymer discovery [4, 5]. A variational autoencoder trained on existing polymer structures generated over ten thousand novel candidates in one application. Subsequent computational screening identified several hundred polymers predicted to have exceptional thermal stability combined with optical transparency, a property combination rarely found in existing materials. Experimental synthesis and characterization of selected candidates confirmed the predictions, validating the generative modeling approach.

The integration of machine learning with high-throughput experimentation creates powerful feedback loops for materials discovery. Automated synthesis and characterization platforms generate large datasets rapidly, which machine learning models use to improve their predictions [6]. These improved predictions guide the next round of experiments, creating an iterative cycle that accelerates toward materials with target properties (see Figure 1). This approach has been successfully

applied to discover polymers, including water purification membranes, battery electrolytes, and photovoltaic materials.

Transfer learning enables machine learning models trained on large datasets to be fine-tuned for specific applications with limited data [7]. This capability proves valuable in polymer research, where comprehensive datasets exist for some properties but remain sparse for others. Models pre-trained on general polymer property databases can be adapted to predict specialized properties using relatively small datasets, extending the reach of machine learning to niche applications.

Discussion

The success of machine learning in polymer research stems from the availability of structured data linking molecular features to material properties. Unlike some scientific domains where data remains scattered across literature in inconsistent formats, polymer science has benefited from community efforts to create standardized databases [2, 6]. These resources provide the foundation for training robust machine learning models that generalize across diverse polymer families.

However, several challenges limit the full realization of machine learning's potential in polymer science. Data quality issues, including experimental errors and inconsistent measurement conditions, introduce noise that degrades model performance. Many polymer properties exhibit complex dependencies on processing history and microstructure, factors not always captured in available datasets. Addressing these limitations requires careful data curation and the development of models that account for processing-property relationships.

The interpretability of machine learning models presents both opportunities and challenges. While deep neural networks achieve high prediction accuracy, their internal workings often remain opaque, limiting chemical insight [4]. Recent developments in explainable artificial intelligence aim to extract human-interpretable rules from trained models, potentially revealing new structure-property relationships. These insights could guide the rational design of polymers beyond purely data-driven approaches.

The integration of machine learning with physics-based modeling creates hybrid approaches combining the strengths of both methodologies. Machine learning models excel at capturing complex patterns in data, but may produce unphysical predictions when extrapolating beyond training data. Physics-based models ensure predictions respect fundamental laws, but often require simplifying assumptions limiting their accuracy. Hybrid models that use machine learning to correct physics-based predictions or to learn parameters for physical models show promise for achieving accuracy and physical consistency.

The continued growth of polymer databases, advances in algorithm development, and increasing computational power will expand machine learning's role in polymer research [1, 7]. Active learning strategies that intelligently select experiments to maximize information gain will improve efficiency. The development of models that can predict polymer properties

under realistic operating conditions, including aging and environmental exposure, will enhance the practical utility of predictions.

Conclusions. The successful application of machine learning in polymer science requires high-quality datasets, appropriate algorithm selection, and careful validation of predictions through experimental work. Challenges, including data quality, model interpretability, and extrapolation beyond training data, require researchers' attention. Future developments will likely focus on hybrid approaches combining machine learning with physics-based modeling, active learning strategies for efficient data collection, and the extension of predictions to long-term material performance under real-world conditions.

The transformation of polymer research through machine learning represents a broader shift toward data-driven materials science. As these technologies mature and become more accessible, they will democratize advanced materials design, enabling researchers worldwide to leverage sophisticated computational tools. This democratization, combined with continued algorithm innovation and data infrastructure development, promises to accelerate the pace of polymer innovation, addressing global challenges in energy, sustainability, and advanced manufacturing. The Python implementation provided as supplementary material offers researchers a practical starting point for implementing these methods in their laboratories, facilitating the broader adoption of machine learning approaches in polymer science.

REFERENCES

1. Chen, G., Shen, Z., Iyer, A., et al. Machine-learning-assisted de novo design of organic molecules and polymers: Opportunities and challenges. *Polymers*, 2020, 12(1), 163.
2. Audus, D.J., de Pablo, J.J. Polymer informatics: Opportunities and challenges. *ACS Macro Letters*, 2017, 6(10), 1078-1082.
3. Mannodi-Kanakkithodi, A., Pilia, G., Huan, T.D., et al. Machine learning strategy for accelerated design of polymer dielectrics. *Scientific Reports*, 2016, 6, 20952.
4. Ramprasad, R., Batra, R., Pilia, G., et al. Machine learning in materials informatics: Recent applications and prospects. *npj Computational Materials*, 2017, 3, 54.
5. Gómez-Bombarelli, R., Wei, J.N., Duvenaud, D., et al. Automatic chemical design using a data-driven continuous representation of molecules. *ACS Central Science*, 2018, 4(2), 268-276.
6. Kim, C., Chandrasekaran, A., Huan, T.D., et al. Polymer genome: A data-powered polymer informatics platform for property predictions. *Journal of Physical Chemistry C*, 2018, 122(31), 17575-17585.
7. Tao, L., Varshney, V., Li, Y. Benchmarking machine learning models for polymer informatics: An example of glass transition temperature. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 2021, 61(11), 5395-5413.

2.3 THE INFLUENCE OF FOOTWEAR UPPER MATERIALS ON INNER MICROCLIMATE

Zbigniew Mikołajczyk¹, Bogusław Woźniak², Natalia Popowych³

¹Technical University Lodz, Poland

²Ogólnopolska Izba Branży Skórzanej, Poland

³Lviv University of Trade and Economics, Ukraine

zbigniew.mikolajczyk@p.lodz.pl

The parameters influenced on inner microclimate during footwear using are discussed. The possibility of using the spacer knitted fabrics as a shoe uppers element are shown. The results of the air permeability test, conducted on special design devices shows, that the distance knitted fabric can be an excellent material for whole shoe uppers or elements of the uppers.

The comfort of using footwear is one of the important factors determining the quality, functionality and usefulness of the product. The concept of comfort (or discomfort) in the use of footwear is difficult to define, its assessment is basically based on the subjective feelings of users. It is assumed that the basic cause of discomfort is too much pressure exerted by the upper and bottom on the user's legs or excessive humidity and temperature inside the footwear. Mechanical comfort (wearing comfort of footwear, its fit) is the subjective assessment of the user, while in the case of thermal comfort, it is necessary to characterize the microclimate inside the footwear during its use. The microclimate in footwear and its hygiene are determined by the temperature and relative humidity inside the footwear during its use [1].

Footwear must not worsen a person's well-being. Therefore, the quality of footwear is largely influenced by its hygiene. It is determined by both the materials used and the product design.

Human clothing, including footwear, is a factor in regulating the body's thermal balance. It was found that the value of the thermal conductivity coefficient of materials used in footwear correlates well with the feeling of comfort for footwear used in winter. This is especially true for sole materials. The situation is slightly different in the case of outer materials. The thermal insulation properties of leather change significantly under the influence of the moisture contained in them. The criteria for feeling comfort for different materials change significantly with changes in ambient temperature. For example, water vapor permeability and sorption properties are decisive for footwear used in summer. In winter, the decisive factor is the thermal insulation properties. The feeling of heat and cold is also related to the permeability of materials. The pressure exerted on the foot by footwear also has a significant impact on the user's thermal sensations.

The problem of hygiene of materials used to make footwear and its impact on the health of feet has been appreciated for many years. On the one hand, this is due to the increasing share of synthetic materials used for footwear elements (resulting from the continuous development of chemistry and processing of

synthetic polymers), on the other hand, we have a deepening shortage and the rising costs of natural leather - traditionally the best material for most footwear elements. In particular, increasingly better or cheaper polymers stimulate the textile industry and chemical companies to produce new, cost-effective and qualitative shoe upper materials. Most often, these are textile materials made of synthetic raw materials with various structures and structures or coated materials, most often with a polyurethane or PVC coating. Such materials have quite good water vapor permeability, with poor sorption properties.

At the same time, it is known that leather used for the upper elements of footwear has very good hygienic properties. This is due to the specific microporous structure of the skin, made of collagen fibers forming a complex spatial network. This allows moisture and heat to be transported to the environment. Additionally, the polar nature of collagen combined with a very well-developed internal surface mean that the skin has the ability to absorb a significant amount of moisture (up to 40% of its weight), while feeling dry. These features and low thermal conductivity are important for the hygienic conditions inside the footwear. Footwear - apart from its protective role - should have appropriate functional and hygienic properties. Good outer materials for footwear are designed not only to remove water vapor produced by the foot, but also to protect it against external factors, such as low temperature or water. Therefore, they must be able to remove water vapor released by the feet well and prevent external water from reaching the foot. If the foot cannot evaporate moisture, its temperature increases.

The foot is one of the parts of the human body that does not maintain constant temperature [2,3] . The lowest temperature values are observed for the toes, while the highest ones appear in the metatarsal and tarsal areas. The temperature in the footwear microclimate, which is most comfortable for the user, ranges from 28 to 34 °C . The relative humidity should, however, be maintained at the level of 60 to 65% [4].

Even slight deviations from these values may cause discomfort and lead to hypothermia or overheating of the body. These processes are closely related to heat exchange with the environment as well as the production of sweat and its transfer away from the surface of the skin; therefore, according to many sources, thermo-physiological comfort is one of the most important aspects determining the functionality of footwear [5].

]The optimum temperature flow inside footwear can be achieved by selecting a set of textile materials that are appropriate in terms of thermal insulation, paying the greatest attention to the volumetric weight, thickness, porosity, and thermal conductivity of fibers. An example of thermal comfort modeling in footwear is the use of membranes, where the outer layer and the lining are matched to the supporting material [6].

.Ensuring adequate thermal comfort by using appropriate footwear is very important because feet are more sensitive to cold compared to other parts of the body, which is mainly due to their large surface area in relation to volume. Feet make up 5% of the total body surface area and only 1% of the total body weight.

The heat loss from each foot accounts for 3.5% of the total heat loss in cold conditions and up to 7% in hot conditions.

Footwear is quite complicated structure. Many materials with different properties are used for its construction. Most often, footwear consists of a sole (sole - most often made of synthetic polymers or rubber, insole (secondary cellulose leather or based on natural leather waste), lining - made of leather or synthetic materials) and an upper - most often made of leather or synthetic leather-like materials, often in combination with various textile materials. Due to its protective function, the sole part of the footwear is a thick layer that well isolates the foot from external conditions. The exchange of heat and moisture with the environment takes place mainly through the shoe upper, which can be divided into several layers: the upper material, the lining and possibly the interlining. The undersole layers also play an important role in absorbing moisture: the lining and the insole. Linings used on the internal elements of shoes, due to their direct contact with the user's foot, largely determine the feeling of comfort. Linings are required to improve the aesthetics of uppers and strengthen weaker outer materials and ensured proper thermal balance inside the footwear. Absorption capacity and excretion of sweat through linings and linings is particularly important to ensure that the foot does not sweat, is dry and that bacteria do not develop on it.

The typical footwear components are shown on Figure 1.



Fig.1. Main parts of the footwear
where: 1 – upper, 2 – insock, 3 – insole, 4- sole

The aim of the work was conducted at Technical University in Lodz was to develop hybrid technology for the outer part of textile footwear (uppers), along with the modeling of functional comfort in terms of thermal and physiology. The partial goal of hybrid technology combines 2D and 3D knitting technology with the embroidery technique. The created multilayer material package of the uppers as well as its components were subjected to functional tests of thermo-physiological comfort.

The purposefulness of this research was dictated by the presentation of the production of a new technology of the textile elements of footwear as well as the characterization of their comfort parameters.

In the design of the textile footwear elements, it was intended to create an upper in the form of a multilayer knitted and embroidered structure, where knitted fabrics were used for the inner layers to ensure physiological and sensory comfort, while the outer layer was made of embroidered polyester threads resistant to mechanical factors and characterized by certain design aesthetics. A standard model of the foot, the so-called ‘last’ were used in the CAD design of the shoe upper form. The project was implemented in the form of a finished pair of sports footwear, manufactured in industrial conditions, based on the developed 3D form, material composition, and technology. Air permeability and thermal resistance with the associated parameters were determined for the materials used in the project and their packages In the design of footwear, it was decided to use a multi-layer system of materials by combining synthetic and natural materials, following the canon of construction of a two-layer knit with increased biophysical values [7].

.According to this canon, a polyester spacer knitted fabric with hydrophobic properties (i.e., low moisture absorption rate), constitutes the footwear lining, that is, the conductive diffusion layer adjacent directly to the body. The moisture appearing inside the footwear is transferred to the next sorption layer with hydrophilic properties, made of cotton knitted fabric, which is excluded from direct contact with the user’s skin. The adopted material design ensures an appropriate microclimate inside the footwear. The structure of the spacer knitted fabric, which consists of two different outer layers (smooth and openwork) connected by a monofilament layer also contributes to the increased physiological and hygienic comfort (Figure 2) [8].

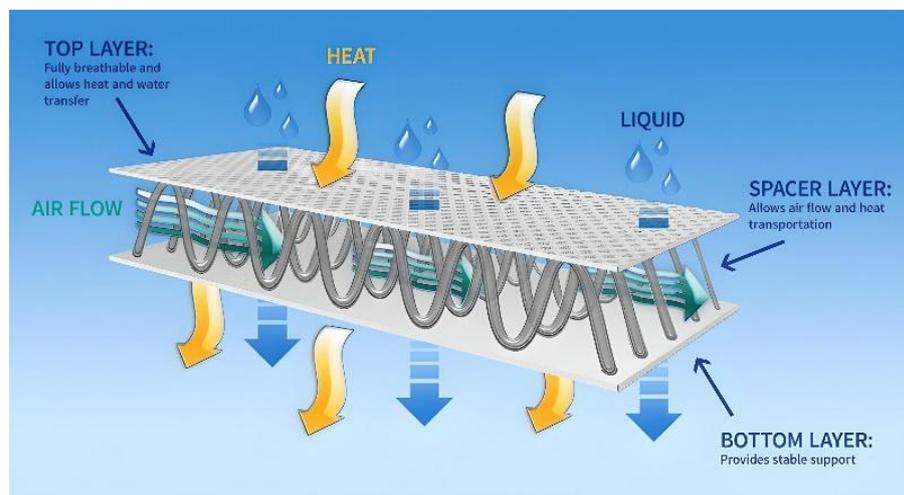


Fig. 2. The structure of the spacer knitted fabrics

The smooth layer is directed toward the cotton fabric, while the openwork is in contact with the foot. The 3D knitted fabrics provides very good air permeability and minimal absorption of moisture and water. Its porous structure in direct contact with the skin allows for air access to the foot, improving the ventilation of the footwear. In order to give the footwear additional cushioning properties and air pumping function, knitted fabric with a structure different from that of the lining can also be used as an insert. The 3D knitted layer also

minimizes the growth of bacteria and mites. The measurement of air permeability according to EN ISO 9237:1995 was carried out on an instrument equipped with a sample jamming holder and a system enabling differential pressure to be obtained on both sides of the sample, with the possibility of measuring its value on the pressure gauge.

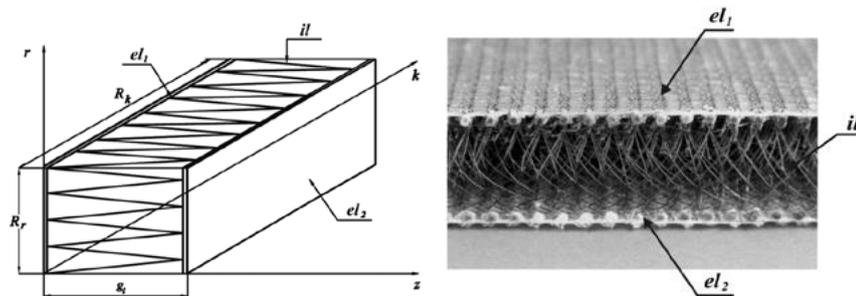


Fig. 3. Three-layer 3D distance knitted fabric; a) geometrical model, b) real view; el1, el2 – external layers, il – internal layer, Rr – course report in direction of r-axis, Rk -wale.report in direction of k-axis.

For each of the tested variants, 10 measurements were performed at various locations of the sample.

The pressure drop used was 200 Pa (technical products) and the tested surface was 9.616 cm². The study was conducted under normal climate conditions. The test was carried out at a temperature of 20 °C and relative humidity of 65%. Air permeability (R) was calculated from the formula:

$$R = qv / A * 167$$

where:

qv - arithmetic mean of the amount of air flowing, dm³/min,

A - tested surface of the sample, cm²,

167- conversion factor.

Due to the high porosity of the spacer knitted fabric and the impossibility of reading differential pressure on both sides (I), a permeability test was performed according to a different method. For this purpose, a device for measuring the air permeability of highporosity 3D materials described in (9) was used . The instrument is shown on Figure 3.

The highest value of air permeability equal to 3322 mm/s was obtained for the distance knitted fabric, which is the lining of the footwear, and the lowest for the cotton weft knitted fabric with embroidery equal to 132 mm/s. Based on the presented results, it can be seen that the embroidery layer significantly reduced the air permeability of the tested material. Due to the spatial structure of the spacer knitted fabric, air is transported not only perpendicular to the knitted fabric surface, but also along the upper, caused by the so-called ‘chimney effect’.

The material package used in the designed upper showed over one hundred times better air permeability than the reference leather material. For the hybrid technology, an over three times higher value of thermal resistance was also obtained, thanks to which the designed footwear will be characterized by higher thermal insulation.

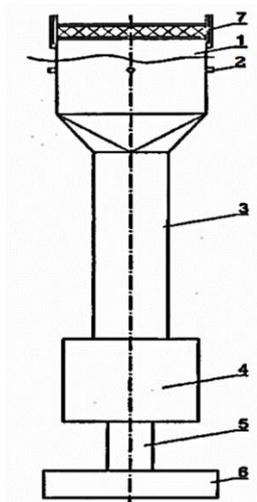


Fig. 4. A schematic diagram of the device for measuring the air permeability of high-porosity 3D materials, where: 1 – measuring head, 2 – placement of the pressure drop device, 3 – pipeline 4 – equalizer tank, 5 – suction pipeline, 6 – device forcing air flow through sample, 7 – pipe section).

The results shows, that the distance knitted fabric can be an excellent material for whole shoe uppers or elements of the uppers.

REFERENCES

1. Wilson. M.: „Comfort factor in footwear”, World Footwear I/II 2001 Vol XV nr 15, s. 19-25
2. Barkley, M.; Bumgarner, M.; Poss, E. Physiological Versus Perceived Foot Temperature, and Perceived Comfort, during Treadmill Running in Shoes and Socks of Various Constructions. *Am. J. Undergrad. Res.* 2011, 10, 7–14
3. Serweta, W.; Matusiak, M.; Olejniczak, Z.; Jagiełło, J.; Wójcik, J. Proposal for the Selection of Materials for Footwear to Improve Thermal Insulation Properties Based on Laboratory Research. *Fibres Text. East. Eur.* 2018, 26, 75–80.
4. Irzmańska, E. The microclimate in protective fire fighter footwear: Foot temperature and air temperature and relative humidity. *Autex Res. J.* 2015, 16, 75–79.
5. Serweta, W.; Olejniczak, Z.; Woźniak, B. Analysis of Insole Material Impact on Comfort During Physical Exertion. *Fibres Text. East. Eur.* 2018, 26, 100–103.
6. Sybilska, W.; Korycki, R. Analysis of Thermal-Insulating Parameters in Two- and Three-Layer Textiles with Semi-Permeable Membranes. *Fibres Text. East. Eur.* 2016, 24, 80–87.
7. Wilnik-Hałgas, B.; Danych, D.; Wiłeczek, B.; Kowalski, K. Air and Water Vapour Permeability in Double-Layered Knitted Fabrics with Different Raw Materials. *Fibres Text. East. Eur.* 2006, 14, 77–80
8. Available online: <https://www.bowistyl.pl/produkty/dzianiny-dystansowe-3d/3d>
9. Polish patent PL 237,156, 2021

2.4 THE ECONOMIC ADVANTAGES OF THE CIRCULAR ECONOMY IN THE TANNING INDUSTRY

Monika Flisek¹, Nataliia Popovych¹, Boguslaw Wozniak²

¹Lviv University of Trade and Economics, Ukraine

²Ogólnopolska Izba Branży Skórzanej, Poland

MonikaFlisek2075@gmail.com, popovych.n1988@gmail.com

The influence of leather tanning process is discussed. The ways of waste processing in the conditions of Polish tanneries is shown. The influence of economic parameters, especially external, for example cost of electrical energy for leather production is shown.

The leather production process involves converting raw hides, an easily rottable raw material, into leather – a durable material that can be used to produce a wide range of products. The entire process consists of a series of complex chemical reactions and mechanical processes. These include tanning, which is the basic stage of the process, as it gives the leather durability and a specific character. The preservation of leather by tanning and a number of other stages of its preparation and finishing leads to the creation of a final product with specific properties, such as appearance, durability, water resistance, temperature resistance, elasticity and permeability of sweat and air, etc. Leather is a raw material used to produce various products, for which it is often the most important starting material. These include shoes, clothing, leather goods, furniture, upholstery for cars, boats and planes, and many other everyday items.

Table 1. Intended use of leather produced in Europe

Industry	Part, %
Footwear industry	50
Clothing industry	20
Upholstery	17
Other industries	13

The above different uses require different leather types. But leather processing always generates by-products, and the type of leather has only little influence on it. While most of the basic steps in leather production have remained the same for years, the industry has undergone significant changes and introduced important environmental improvements.

Regulations on pollution control, waste minimization and disposal, proper use of chemicals and accident prevention are key elements in minimizing the potential impact on air, water and soil from the leather processing industry. Solutions to better protect the environment are often complex and must be assessed against the backdrop of other overall costs and benefits. Changing techniques may have a potential impact on other technological modules,

therefore techniques should be selected that allow achieving the best environmental impact from the process as a whole. Best available techniques will be assessed against these criteria and may therefore involve changes to both process modules and downstream pollution reduction techniques [1].

Leather production is a raw material and capital-intensive industry. Environmental costs for EU tanners are estimated at around 5% of turnover. Average proportion to production cost are showed below.

Table 2. Average share of main costs

Main costs	Part, %
raw materials	50-70
labor	7-15
chemicals	10
energy	3
other	5-15

These figures refer to Europe in general. In the case of Polish tanneries, these proportions have been slightly different in recent years, as labor costs are not lower than 15% and energy costs are close to 8%. This is due to the dynamic increase in wages and energy costs in Poland. The average salary was PLN 5,167.64 in 2020 and PLN 8,962.28 in the first quarter of 2025 [2].

During the last quarter of last year, the average energy price for companies was approximately USD 0.566, which translates to approximately PLN 2.19/kWh. This amount significantly exceeds average global rates. Only a few countries in Europe and around the world have higher energy costs for industry, which puts Poland at an international disadvantage. The data shows that the Polish industry pays significantly more than companies in many other countries, which may constitute a barrier to investment and hinder the development of competitiveness on the global market.

In Poland, energy prices for industry have increased by as much as 43.3% from 2021 to 2024, which makes these expenses significant in the balance sheet of a manufacturing company [3].

Environmental innovations in the leather industry are typically focused on chemicals rather than production machinery. The most visible changes in the 21st century have occurred in leather finishing, in particular changes in water-based finishing, which were dictated by environmental protection requirements. New chemicals and processes have been developed to enable leather to be produced to many different specifications.

In Poland, with a processing volume of approximately 21,000 tons of raw leather (2018), approximately 12,600 kg of solid waste and approximately 70,000 m³ of liquid waste are generated. Waste from the tanning industry is disposed of along with conventional waste, which, depending on the country, is landfilled or incinerated. Solid waste may be untanned (raw hide waste): from unhairing and muscle removal, skin strippings and trimmings.

Waste from tanned leather is generated during splitting, leveling and grinding (in this case in dusty form).

In turn, liquid waste is generated as a result of soaking preserved leather (water with a high sodium chloride content), as a result of tanning operations (solutions of chemicals, including those containing chromium III), and as a result of leather finishing (solutions containing dyes or water-based varnishes, e.g. acrylic).

The proportions between individual types of waste may vary depending on the type of leather and specific tanning technologies used.

The transition from a traditional, linear economy to a Circular Economy in the tanning industry is not only an environmental necessity, but above all a strategic business decision that brings significant economic benefits. The most important benefits bringing by the circular economy to the tanning industry are listed below.

Economic benefits

One of the most direct economic benefits of circular economy is a significant reduction in operating costs.

- Waste disposal costs: Traditional methods of disposal of tannery waste, especially those containing chromium, are very expensive. Fees for storing or burning tons of hazardous waste can range from several hundred to even several thousand zlotys per tonne. By implementing circular economy technologies that minimize the amount of waste going to landfills, companies drastically reduce these expenses.

- Less use of virgin raw materials: Recovering chromium from tanning waste means the tannery needs to buy less new chromium for the tanning process. Similarly, extracting proteins from waste can reduce the need for new protein raw materials in other sectors. This directly translates into savings on the purchase of expensive raw materials.

- Process optimization: The transition to circular economy often forces the review and optimization of the entire production process, which can lead to increased efficiency in the use of water, energy and chemicals, generating further savings.

Generating New Revenue Streams

Circular economy not only reduces costs, but also opens up new earning opportunities by transforming waste into valuable products.

- Sale of recovered raw materials:

- o Chromium: Recovered chromium, after appropriate processing, can be reused in tanning processes (in a closed loop) or sold to other industries (e.g. metallurgy, chemistry).

- o Proteins: Extracted proteins can be used in the production of feed, fertilizers, glues, and even in the pharmaceutical or cosmetic industry, creating new product lines and markets.

- Energy production: Producing biogas from the organic fraction of tannery waste (e.g. sewage sludge) can provide the company with its own

energy source (heat, electricity), which reduces energy bills. Surplus biogas can be sold to the grid, generating additional revenue.

- **Development of new services:** Companies that master innovative valorization technologies can offer their services to other enterprises in the industry, becoming recycling and recovery centers.

Increasing Competitiveness and Improving Image

In an era of growing ecological awareness, being «green» is becoming a significant competitive advantage.

- **Image and reputation:** Companies operating in accordance with the principles of circular economy are perceived as socially and environmentally responsible. This builds a positive brand image, increases the trust of customers and business partners, and attracts talented employees.

- **Access to new markets:** Many companies, especially in the fashion and luxury sectors, are looking for suppliers that employ sustainable practices. Switching to circular economy may open the door to new, more demanding markets.

- **Investors and financing:** Investors increasingly prefer sustainable companies, which may facilitate raising capital and access to «green» funds.

Compliance with Legal Regulations and Access to Funds

Environmental protection and waste management regulations are becoming more and more stringent, and circular economy is a priority at the EU and national level.

- **Avoiding fines and fees:** Failure to meet environmental standards can result in high fines and fees. Implementing circular economy allows for compliance with regulations and avoidance of sanctions.

- **Access to subsidies and support programs:** Projects in the field of circular economy and eco-innovation are often preferred in EU programs and national subsidies (e.g. from structural funds, programs such as CORNET). Companies actively operating in this area have a greater chance of obtaining funds for development and investment.

- **Easier permitting:** Companies that promote sustainable solutions and minimize negative environmental impacts may face fewer administrative barriers in the permitting process.

Investments and Long-Term Development

Although the implementation of circular economy technologies requires initial investments (in research, development, infrastructure, obtaining permits), they are treated as investments in the future.

- **Resilience to fluctuations in raw material prices:** Less dependence on virgin raw materials increases the company's resilience to global price fluctuations.

- **Innovation:** Companies investing in circular economy become innovation leaders, which translates into long-term technological and market advantage.

- **Sustainability:** In the long term, circular economy ensures business stability and resilience, preparing the company for future environmental and market challenges.

To sum up, the economic aspects of the Circular Economy in the tanning industry are multidimensional and go beyond simple cost reduction. Circular Economy is a comprehensive strategy that allows companies not only to meet environmental challenges, but also to build new sources of revenue, strengthen their market position and ensure long-term, sustainable development.

Conclusions. High and growing disposal costs and increasingly stringent legal requirements in the field of environmental protection and circular economy constitute a strong motivation for the tanning industry to invest in innovative technologies that allow for effective and sustainable waste management, transforming it from a problem into a resource.

The circular economy concept, promoted both at the EU and national level, assumes minimization of the consumption of raw materials and the generation of waste. In circular economy, every material is treated as a potential raw material for reuse. Principles such as the «6Rs» (Refuse, Reduce, Reuse, Repair, Recycle, Rot) provide guidelines for businesses. The project of valorization of chrome tannery waste fits perfectly into the idea of circular economy, transforming waste into valuable raw materials (proteins, chrome) and energy (biogas), which is in line with the latest trends and legal requirements.

REFERENCES

1. Best available techniques (BAT) reference document for the tanning of hides and skins. Industrial Emissions Directive 2010/75/EU
2. Statistical yearbook of the Central Statistical Office, 2024
3. [https:// www.globenergia.pl](https://www.globenergia.pl)

2.5 УПРАВЛІННЯ АСОРТИМЕНТНОЮ ПОЛІТИКОЮ СИНТЕТИЧНИХ МИЙНИХ ЗАСОБІВ

Жалдак М. П.¹, Полюга В. О.¹, Мокроусова О. Р.^{1,2}

¹Державний торговельно-економічний університет

²Київський національний університет технологій та дизайну
m.zhaldak@knu.edu.ua

В роботі розглянуті питання стану ринку синтетичних мийних засобів України, включаючи пральні порошки. Охарактеризовано динаміку експортно-імпорتنих операцій досліджуваного товару. Проаналізовано основні фактори управління асортиментною політикою синтетичних мийних засобів. Проведено соціологічне опитування споживачів, яке визначило основні вподобання щодо вибору пральних порошків. Визначено торговельні марки, що користуються найвищим попитом. Проведено дослідження показників соціологічних та технологічних факторів пральних порошків. Розроблено емблеми, що дозволяють суттєво полегшити вибір пральних порошків, залежно від потреб споживача.

Ключові слова: *пральний порошок, імпорт, експорт, якість, асортимент, емблема.*

Швидкий розвиток науково-технічного прогресу в хімічній промисловості призводить до постійного розширення потужностей і асортименту ринку синтетичних мийних засобів (СМЗ). Для сучасних людей по всьому світу СМЗ стали невід'ємною частиною високої якості життя, яка включає такі аспекти, як якість навколишнього середовища, умови проживання, безпека, а також фізичний комфорт, якість сну та відпочинку [1].

Проблематика управління асортиментною політикою СМЗ – це складний і багатогранний процес, що вимагає врахування низки взаємопов'язаних чинників. Ефективне управління асортиментом допомагає підприємствам максимізувати прибуток, утримувати конкурентні позиції та задовольняти потреби споживачів, що постійно змінюються.

Перевага споживача надається СМЗ, які можуть забезпечити очікуваний результат, але не варто забувати про важливість їх якості. Це безпосередньо впливає на здоров'я споживачів та навколишнє середовище, адже переважна частка СМЗ, що представлені на ринку України містять у своєму складі агресивні поверхнево-активні речовини (ПАР), а також фосфати натрію та калію.

В умовах сучасних екологічних викликів, зумовлених антропогенним впливом на біосферу, проблема забруднення гідросфери небезпечними сполуками набуває особливої актуальності. Для СМЗ найбільш негативний вплив створюють фосфати, тому застосування серед СМЗ безфосфатних пральних порошків є ефективним інструментом

мінімізації негативного впливу на водні екосистеми. На відміну від традиційних пральних порошків, що містять фосфати — потужні біогенні елементи — безфосфатні аналоги запобігають процесам евтрофікації, тобто надмірному розвитку водоростей. Запобігання «цвітінню» води сприяє підтриманню оптимального рівня розчиненого кисню, що є критично важливим для життєдіяльності гідробіонтів, а також запобігає утворенню токсичних речовин, що погіршують якість питної води. Таким чином, для СМЗ перехід на безфосфатні пральні порошки є не лише екологічно відповідальним кроком, а й важливим компонентом стратегії сталого розвитку та збереження природних ресурсів.

Відповідно до постанови Кабінету Міністрів України № 717 від 20 серпня 2008 року «Про затвердження Технічного регламенту мийних засобів» [2]. побутовий мийний засіб (ПМЗ) – засіб, що використовується у побутовій сфері для прання, миття та очищення. ПМЗ – широка група товарів, яка включає пральні порошки.

До початку повномасштабного вторгнення український ринок пральних порошків можна було вважати досить розвинутим. Це підтверджували декілька факторів. По-перше, в Україні були представлені майже всі міжнародні бренди.

По-друге, спостерігалось різноманіття в цінових і функціональних пропозиціях: споживач мав можливість обрати продукцію в будь-якому ціновому діапазоні та придбати порошок, призначений для різних видів білизни або для одягу певного кольору.

По-третє, все більше українців виявляли інтерес до екологічної безпеки пральних засобів, що є прогресивним показником навіть для європейського ринку. Внаслідок повномасштабного вторгнення було порушено всі логістичні ланцюги, що з'єднували Україну з європейськими постачальниками, країна зіткнулася з істотним дефіцитом пральних порошків. Однак пізніше ситуація стабілізувалась.

Забезпечення українського ринку якісними пральними порошками здійснюється під впливом кількох факторів: потреб споживачів, вимог ринку, розвитку технологій та стандартів екологічної безпеки. У рамках інтеграції України до Європейського Союзу вітчизняний ринок пральних порошків все частіше заповнюється товарами іноземного виробництва. Тому доцільним є формування та управління асортименту останніх через підвищення їх якості. Окрім того, актуальність теми дослідження визначається тим, що в сучасних умовах активно розробляються та впроваджуються нові речовини, групи і класи сполук, що знайшли широке застосування в багатьох секторах економіки як проміжні, так і кінцеві продукти, і які потребують гігієнічної регламентації. Таким чином, управління асортиментною політикою СМЗ є критично важливим аспектом для подальшого розвитку цього сегменту ринку та задоволення потреб споживачів.

Питання оцінки якості СМЗ (включаючи пральні порошки) висвітлено в роботах багатьох вітчизняних та іноземних науковців. Т.

Коломієць та Л. Черняк [3]. здійснювали оцінку якості безфосфатних порошків для прання білизни. Ільчук О.С. [4] визначала вплив синтетичних мийних засобів на здоров'я людини шляхом дослідження компонентів, що входять до складу цих засобів. Чернявська А. Ю. [5] здійснювала дослідження впливу хімічних сполук у складі синтетичних миючих засобів на довкілля методом біоіндикації.

Черевата Т.М. [6] досліджувала асортимент та споживні властивості пральних порошків. Також висвітлювалися проблеми якості синтетичних мийних засобів і у працях іноземних науковців. А. Ferri [7] досліджувала вплив СМЗ та добавок на задоволеність споживачів. Irshad N. Shaikh, та M. Mansoor Ahammed [8] проводили дослідження, що стосуються впливу методу прання та типу миючого засобу на характеристики води після прання. Abdal-Rhman Magdy Abdullah Youssef [9] досліджує та вдосконалює основні компоненти пральних порошків, що підвищують мийну здатність останніх.

Відповідно до попередніх досліджень[10], на споживчу поведінку впливає ряд факторів. Соціологічні та технологічні фактори є основними детермінантами прийняття споживчих рішень. Соціологічні фактори, такі як потреби, особистісні характеристики, соціальні та економічні чинники, формують соціальний контекст, в якому відбувається споживча поведінка. Технологічні фактори включають вимоги до маркування та показники якості товарів (розчинність у гарячій/холодній воді, водневий показник рН, піностійкість, піноутворювальна здатність, здатність відпирати забруднення).

В результаті постає необхідність комплексного аналізу управління асортиментною політикою СМЗ, що спрямований на оцінку поточної ефективності формування та управління асортиментом досліджуваних товарів з метою збільшення прибутку, задоволення потреб споживачів та оптимізацію ресурсів.

Компанії, які займаються виробництвом пральних порошків, в умовах війни потребують постійних удосконалень та здатності швидко реагувати на ризики, присутні на ринку України. Але при цьому, виробникам необхідно розуміти, що саме якість пральних порошків та формування асортименту є ключовими детермінантами у виборі споживачами.

Мета – управління асортиментною політикою синтетичних мийних засобів та виявити основні технологічні та екологічні фактори, що впливають на її формування.

Об'єктом дослідження є синтетичні мийні засоби, зокрема пральні порошки.

Предмет дослідження – технологічні та екологічні фактори, що впливають на управління асортиментною політикою синтетичних мийних засобів (пральних порошків).

Методи та матеріали

Дослідження ринку відбувалось шляхом аналізу статистичних баз

даних Державної служби статистики України та Державної митної служби України.

Опитування здійснювалося методом проведення анкетування респондентів. Оскільки синтетичні мийні засоби є товарами масового споживання, в опитуванні брали участь споживачі різних категорій та соціальних груп. Основними критеріями, за якими поділено споживачів, є такі: вік, стать, місячний зарібок. В опитуванні взяли участь 136 респондентів, що проживають у різних регіонах України.

Також в роботі використано загальнонаукові методи дослідження управління асортиментною політикою товарів: системний і комплексний аналіз, синтез, а також методології SWOT-аналізу та матриці BCG (Boston Consulting Group).

Матрицю BCG використано для стратегічного аналізу асортименту СМЗ (пральних порошків), щоб визначити, які товари потребують інвестицій, які приносять стабільний прибуток, а які варто розвивати або виводити з ринку. Це допомагає оптимізувати розподіл ресурсів, розробляти ефективні маркетингові стратегії та забезпечувати збалансований розвиток компанії в майбутньому. що «Дійні корови» (Cash Cows) – це товари, що мають високу частку на ринку, який повільно зростає. Вони приносять стабільний і значний прибуток, не вимагаючи великих інвестицій на просування. Прибуток від них можна використовувати для фінансування «Зірок» та «Знаків питання». «Зірки» (Stars) – це товари, що мають високу частку на ринку, який швидко зростає. Вони є лідерами продажів і вимагають значних інвестицій для підтримання конкурентоспроможності. «Знаки питання» (Question Marks) – це товари, що мають низьку частку на ринку, який швидко зростає. Їхнє майбутнє невизначене, тому вони й називаються «Знаками питання». Вони вимагають значних інвестицій, щоб збільшити свою частку ринку і стати «Зірками». «Собаки» (Dogs) це товари, що мають низьку частку на ринку, який не зростає. Вони приносять мінімальний прибуток або навіть збитки, і не мають великих перспектив. Стратегія щодо них часто полягає в мінімізації витрат або повній ліквідації [11].

SWOT-аналіз в асортименті використано для стратегічного планування та виявлення нових можливостей для зростання. А також для своєчасного реагування на конкурентне середовище та адаптації до змін ринку шляхом аналізу сильних (Strengths) і слабких сторін (Weaknesses) асортименту СМЗ, зовнішніх можливостей (Opportunities) і загроз (Threats), що дозволяє приймати обґрунтовані рішення щодо розвитку товарної лінійки [12].

Встановлення сильних сторін допомагає чітко ідентифікувати внутрішні ресурси та характеристики, які вирізняють об'єкт аналізу від конкурентів (наприклад, унікальна технологія, сильний бренд, кваліфікований персонал).

Аналіз слабких сторін виявляє внутрішні недоліки та обмеження (наприклад, застаріле обладнання, висока собівартість, погана

репутація). Це дозволяє розробити план для їх усунення або мінімізації їхнього негативного впливу.

Обґрунтування можливостей допомагає знайти зовнішні сприятливі чинники (наприклад, нові ринки, зміна законодавства, технологічний прогрес), які можна використати для розширення бізнесу та збільшення прибутку.

Аналіз загроз визначає зовнішні несприятливі фактори (наприклад, дії конкурентів, економічна криза, зміна споживчих вподобань), які можуть зашкодити досягненню цілей. Це дозволяє розробити превентивні заходи та плани реагування [12].

Дослідження показників якості відбувалося шляхом аналізу маркування досліджуваних зразків пральних порошків (згідно вимог Технічного регламенту мийних засобів [2]) та органолептичних і фізико-хімічних показників якості. Зовнішній вигляд порошків визначено візуально за температури навколишнього середовища (20 ± 2) °C та природного денного освітлення. Здатність пральних порошків до відпирання оцінювали за допомогою спеціально розробленої авторської методики. Вона включала підготовку еталонних забруднених зразків, які потім пралися згідно з інструкцією виробника. Ефективність прання визначалася візуальним порівнянням результатів з незабрудненим зразком-контролем. Для кількісної оцінки видалення різних видів забруднень була розроблена уніфікована 5-бальна шкала. Водневий показник рН, піноутворення та піностійкість визначали згідно з ДСТУ 2972:2010 «Засоби мийні синтетичні порошкоподібні. Загальні технічні вимоги та методи випробовування» [13].

На основі попередніх досліджень [10] було розроблено ряд універсальних додаткових розпізнавальних емблем на маркуванні СМЗ з використанням програмного забезпечення CorelDRAW.

Результати

Товари побутової хімії (ТПХ) включають мила, синтетичні мийні засоби (СМЗ), очищувальні, полірувальні, плямовивідні, дезінфікуючі засоби, а також мінеральні добрива та отрутохімікати. До СМЗ відносяться пральні порошки, рідкі мийні засоби та допоміжні засоби для прання. Пральні порошки виготовляють з використанням поверхнево-активних речовин (ПАР) та біологічно-активних речовин (БАР). Україна – це привабливий ринок для збуту пральних порошків на основі ПАР через високу чисельність населення та вигідне географічне положення. Проте відсоток власного промислового виробництва ПАР, таких як: алкілбензолсульфонат натрію, алкілсульфати вищих жирних спиртів, алкілефірсульфати, які є основою пральних порошків, досить низький [14].

Окрім того, в складі пральних порошків присутній такий компонент, як фосфати. Фосфати натрію та калію в пральних порошках використовуються для пом'якшення води, зв'язуючи іони кальцію та

магнію, що дозволяє ПАР ефективніше видаляти бруд. Також вони підсилюють миючу дію порошку, роблячи прання ефективнішим, але є небезпечними для здоров'я та довкілля, оскільки можуть викликати алергічні реакції та сприяти цвітінню водоекосистем. Тому, виробники частіше в пральних порошках замість фосфатів використовують цеоліти, фосфонати, карбонати, силікати, цитрати та інші компоненти, а також натуральні речовини, як виконують ті ж функції, але без шкоди навколишньому середовищу. Цеоліти є природними мінералами-сорбентами, які добре видаляють бруд з тканин.

На сьогодні асортимент пральних порошків, які представлені на ринку України, є різноманітним, але хімічний склад їх доволі однотипний. Переважну частку становлять пральні порошки на основі синтетичних аніоноактивних ПАР, а пральні порошки ПАР іншого походження, зокрема на основі натуральних ПАР, представлені в невеликому обсязі.

За даними Державної митної служби України [15] динаміка зовнішньої торгівлі поверхнево-активними органічними речовинами (крім мила); поверхнево-активними препаратами, засобами для прання, миття (включаючи допоміжні мийні засоби) та засоби для чищення із вмістом або без вмісту мила (товарна позиція згідно з УКТЗЕД 3402) протягом 2019-2024рр. мала нестабільну тенденцію розвитку (рис. 1).

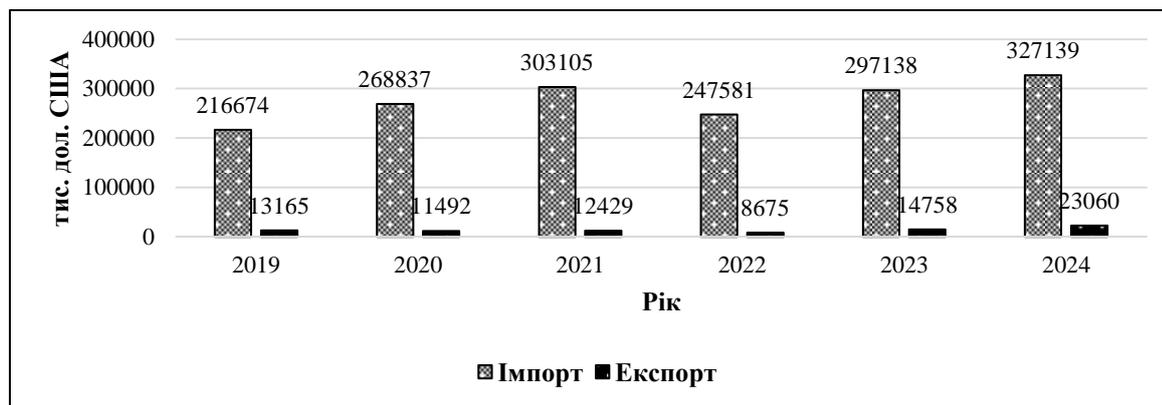


Рис. 1. Динаміка обсягів експортно-імпортних операцій з ПАР, засобами для прання, миття та чищення за товарною позицією 3402 згідно з УКТЗЕД (в т.ч. пральними порошками), у 2019-2024рр., тис. дол. США

Протягом останніх років імпорт даного товару переважав експорт у 14-28 разів, що значною мірою впливає на економіку України: зменшення надходження валюти, обмеження розвитку вітчизняної промисловості, створення залежності від імпорту. Такий дисбаланс у торгівлі пральними порошками призводить до значних втрат для вітчизняних виробників.

Підвищення рівня конкурентоспроможності вітчизняних пральних порошків порівняно з імпортними дозволить підняти рівень зайнятості в країні з її подальшим економічним зростанням.

Імпорт продукції стрімко зростає, незважаючи на падіння у 2022 році, що було спричинене повномасштабним вторгненням РФ. Свого максимуму за даний період імпорт продукції сягнув у 2021 році –

303105 тис. дол. США. Обсяги експорту коливаються, найменший показник у 2022 році – 8675 тис. дол. США, а найбільшого рівня він досяг у 2024 році – 23060 тис. дол. США. Саме це дає можливість сподіватись на розвиток вітчизняної продукції, збільшення її обсягів на українському та іноземному ринках, а також наближення сальдо до позитивного [15].

Згідно даних Державної митної служби України [15] встановлено, що найбільша частка продукції, яку імпортували в 2019 році належить таким державам, як: Польща – 22,97%, Німеччина – 13,37%, Чехія – 7,86 та інші країни – 55,80%. Експортували свою продукцію до таких держав: Молдова – 20,41%, Італія – 15,49%, Болгарія – 14,98% та до інших держав – 49,12%. У 2020 році найбільше пральних порошків було імпортовано з Польщі – 24,97%, Німеччини – 11,23%, Угорщини – 7,9% та інших держав – 55,90%. Обсяг експортованої продукції був найбільшим до таких держав, як: Молдова – 25,57%, Болгарія – 18,91%, Чехія – 6,93% та інші – 48,60%. У 2024 році зберігається схожа тенденція. Найбільше пральних порошків імпортується з Польщі, Чехії та Німеччини, а експортується до Румунії, Молдови та Польщі. Найбільша кількість пральних порошків імпортується з Польщі, Німеччини та Чехії, в різні роки лідерами були й Угорщина і Франція. Експортується продукція переважно в Молдову та Болгарію, також Чехію, Грузію, Румунію, Латвію та Італію.

Основними виробниками пральних порошків є транснаціональні компанії:

- Procter & Gamble (торговельні марки (ТМ) Ariel, Tide);
- Henkel (ТМ Persil, Rex, Perwoll, Losk);
- Unilever (ТМ ОМО) [16].

Вітчизняні компанії, що виробляють пральні порошки ТМ Вухастик, Alles GUT!, WASCHKONIG та Gala, Ariel, Persil, реалізують їх як в Україні, так і за її межами, тим самим формуючи зовнішньоекономічну діяльність.

В результаті аналізу ринку засобів для прання, встановлено, що одним з найбільш значимих сегментів ринку, майже 70% якого займає пральний порошок, а 30% – допоміжні засоби для прання. Серед останніх найбільш перспективним сегментом, як думають експерти, є сегмент концентрованого прального порошку, що широко представлений на світовому ринку й поки мало представлений в Україні [17].

Обсяги виробництва миючих і чистячих засобів, що упаковані і індивідуальному пакуванні для роздрібного продажу, у 2024 році склали 39,7 тис. т. При цьому до 47% українського ринку синтетичних мийних засобів контролювала компанія Procter & Gamble (zareestrovana y Lyuksemburzi), яка представляє на ринку України більше ніж 40 торговельних марок (Ariel, Tide, Gala) [18].

Procter & Gamble отримала можливість контролювати значну частку

ринку після придбання виробництва українсько-турецької компанії Olvia Beta та розширення цінового асортименту пропонованої продукції. Після злиття Procter & Gamble представляла свою продукцію під брендами Ariel, Tide і Bonux у вищому ціновому сегменті, але останнім часом продукція під брендами Gala і Daх, вироблена на потужностях Olvia Beta, позиціонується як низькоцінова.

Значна частина продукції польського виробництва, яка включає марки MrProper, Dreft, Fairy, Ace, Lenor і інші, також входить в їх асортимент.

Після Procter & Gamble на ринку друге місце займає компанія Henkel (США-ЄС), хоча з відчутним розривом. Через Henkel-Україна з ЄС і СНД експортується широкий асортимент продукції під відомими марками Persil, Rex, Perwoll, Pur, Bref, Silan, Losk. Henkel займає приблизно 15% ринку.

Однак, у контексті масштабів діяльності компанії, чий світовий обсяг продажів становить \$17 млрд., Україна не має такого важливого значення, як для Procter & Gamble [19].

На рис. 2 наведено частки основних виробників синтетичних миючих засобів, чия продукція представлена на вітчизняному ринку [20].

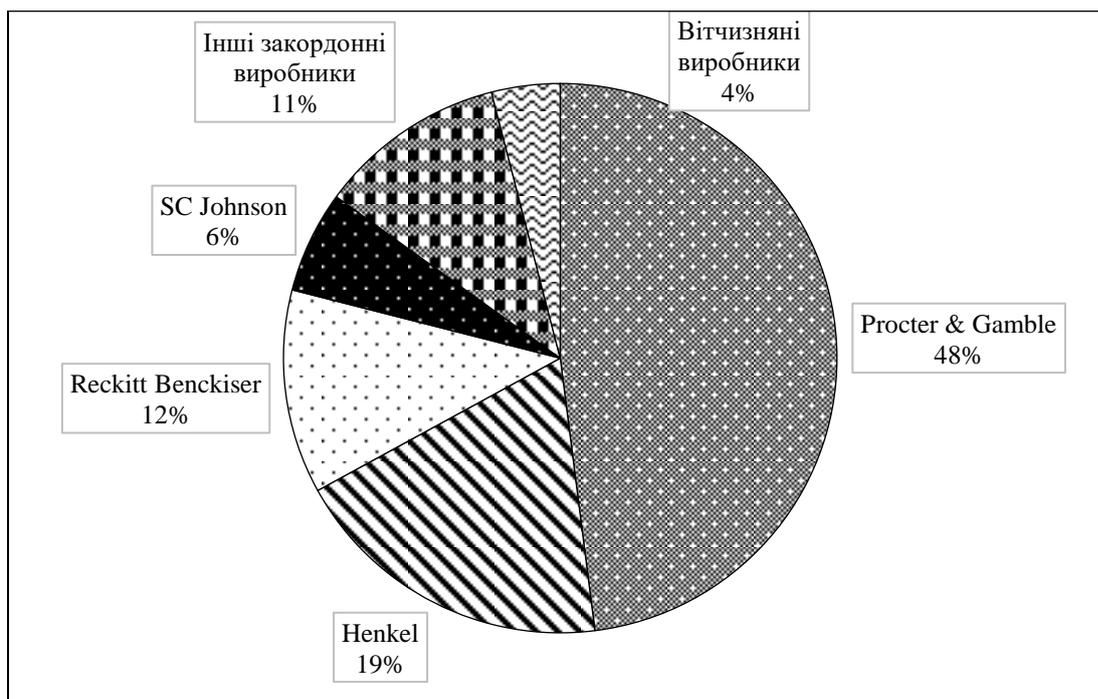


Рис. 2. Структура українського ринку синтетичних миючих засобів в залежності від виробників, 2024р.

Український ринок побутової хімії все ще залежить від фосфатів. За статистикою, близько 80% пральних порошків містять ці хімічні сполуки. Основна причина — фінансова. Поки нормативна документація не забороняє використання фосфатів, виробники не поспішають інвестувати у перехід на більш екологічні, але дорожчі замінники натурального походження.

Екологічні аспекти сучасного етапу для країни ЄС активно формуються шляхом відмови від фосфатів, і такий процес очищення

від них розвивається досить швидко. На сьогодні в Німеччині, Австрії, Швейцарії, Норвегії, Нідерландах, Ізраїлі, Бельгії, США реалізуються безпечні для здоров'я та довкілля порошки без вмісту фосфатів. У США в третині усіх штатів діють закони про заборону використання пральних порошків, які містять фосфати.

Разом з тим, унаслідок проведення інформаційної кампанії щодо роз'яснення небезпеки використання фосфатів у порошках, українські споживачі все частіше надають перевагу безфосфатним мийним засобам. Останнім часом на ринку з'являється більше вітчизняних і закордонних порошків, які не містять у своєму складі фосфати, ароматизатори, оптичні відбілювачі, хлор та інші шкідливі речовини.

На відміну від України, в Європейському Союзі законодавство суворо обмежує використання фосфатів, що спонукає виробників обирати безпечніші альтернативи. Тому європейські бренди, що представлені на нашому ринку, часто вже є безфосфатними. Згідно з Технічним регламентом мийних засобів [2] набули чинності нові норми безпечності, що значно обмежують вміст фосфатів у пральних порошках. Це змусить виробників поступово відмовлятися від фосфатів, роблячи український ринок чистішим та безпечнішим. Таким чином, безфосфатним пральним порошком можна вважати такий, вміст фосфатів у якому становить менше 5%.

В результаті проведення комплексного статистичного дослідження пральних порошків, що реалізуються на ринку України (ТОВ «Епіцентр К» [21], ТОВ «РУШ» – мережа магазинів «Єва» [22], ТОВ «МАУДАУ» – інтернет-магазин «MAUDAU» [23], ТОВ «Нова Лінія1» – мережа магазинів «Нова лінія» [24], ТОВ «РОЗЕТКА.УА» – інтернет-магазин «Rozetka» [25]) встановлено, що частка безфосфатних порошків займає 20% (рис. 3).

Досліджено, що в структурі асортименту найбільших торговельних мереж України, найбільшу частку займають універсальні пральні порошки – 26%, на другому місці порошки з низькопінними ПАВ (28%), а на третьому – безфосфатні.

Асортимент безфосфатних пральних порошків налічує наступні ТМ:

- Grunwald, Miele, Denkmit, Liesti, Sodasan (Німеччина);
- Alles GUT!, UIU, TORTILLA, DeLaMark, Green&Clean, Tino High-Power Mountain, Green Max (Україна);
- Wei, Green Line (Чехія);
- E Kolor, Clever (Польща);
- A+ (Іспанія) (рис. 4).

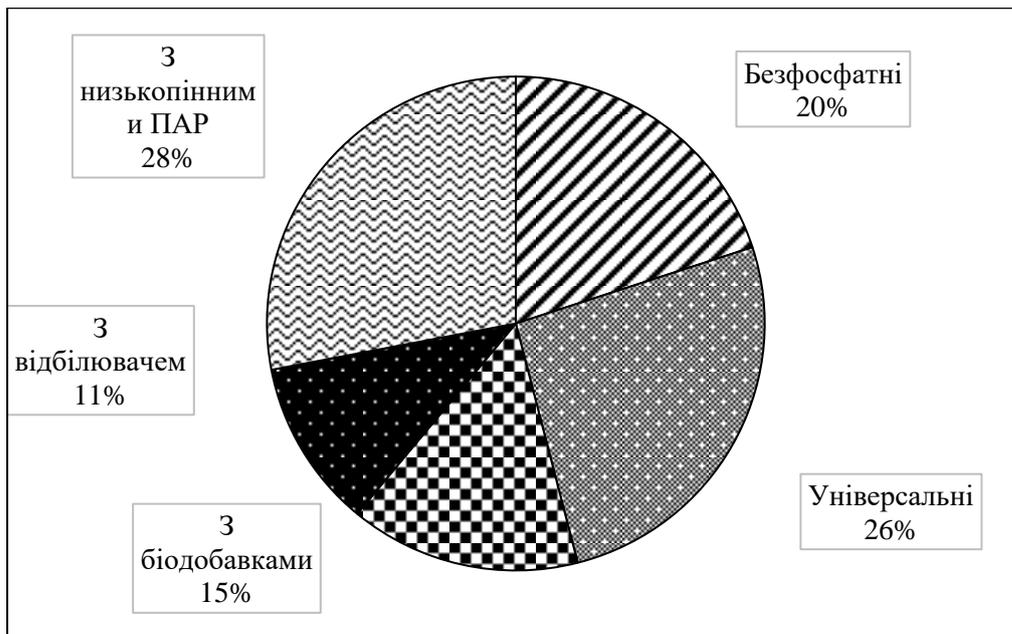


Рис. 3. Структура асортименту пральних порошків в найбільших торговельних мережах України за складом, 2025 р.

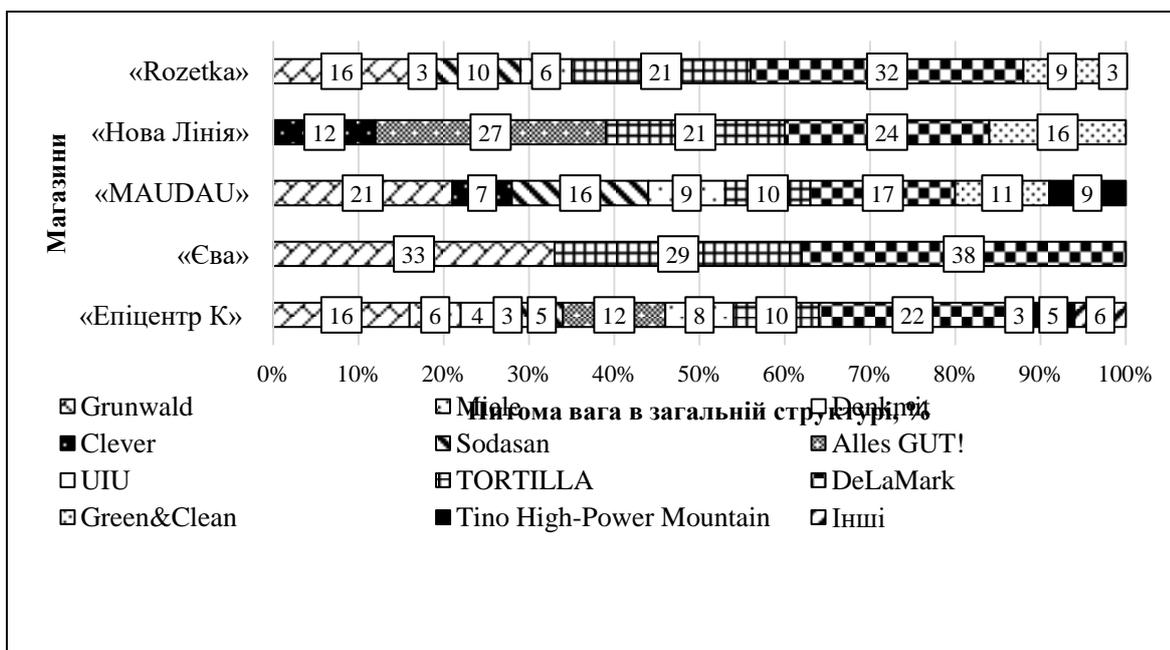


Рис. 4. Структура асортименту безфосфатних пральних порошків в найбільших торговельних мережах України за торговельними марками, 2025 р.

Аналізуючи рис. 4, можна констатувати, що для посилення екологічного акценту в асортименті в досліджуваних торговельних мережах найбільшу частку займають безфосфатні порошки ТМ DeLaMark, Alles GUT!, Grunwald та TORTILLA. Найбільший асортимент безфосфатних пральних порошків представлений в торговельній мережі ТОВ «Епіцентр К» – 16 торговельних марок. Також досить широкий асортимент магазинів «MAUDAU» та «Rozetka» – по 8 торговельних марок. Асортимент безфосфатних пральних порошків магазину «Нова лінія» – 5, магазину Єва – 3.

Необхідно зазначити, що такі торговельні марки як Miele, Denkmit, Liesti, Green Max, Wei, Green Line та E Kolor представлені лише в магазині «Епіцентр К». Сумарні їх частка складає 16%.

В структурі асортименту безфосфатних пральних порошків мережі «Епіцентр К» найбільшу частку займає ТМ DeLaMark – 22%, на другому місці ТМ Grunwald – 16%, на третьому – ТМ Alles GUT! – 12%. Тобто сумарна частка зазначених ТМ становить половину всього асортименту безфосфатних пральних порошків.

Найбільшу частку (38%) в мережі магазинів «Єва» становить ТМ DeLaMark, а найменшу (29%) – ТМ TORTILLA.

Аналізуючи асортимент безфосфатних пральних порошків інтернет-магазину MAUDAU, слід зазначити, що найбільшу частку займає ТМ Grunwald (21%), на другому місці – ТМ DeLaMark (17%), на третьому – ТМ Sodasan (16%). Найменша частка належить ТМ Clever (7%).

Для асортименту безфосфатних порошків мережі «Нова лінія» характерним є те, що найбільшу частку займає ТМ Alles GUT! (27%), на другому місці ТМ DeLaMark (24%), на третьому – ТМ TORTILLA (21%). Найменшу частку в структурі даної мережі займає ТМ Clever.

В структурі асортименту безфосфатних порошків інтернет-магазину «Rozetka» ТМ DeLaMark займає 32%, ТМ TORTILLA – 21%, ТМ Grunwald – 16%. Найменшу частку займають ТМ Clever та ТМ Tino High-Power Mountain – відповідно по 3%.

В асортименті безфосфатних порошків вищезазначених торговельних мереж представлена продукція різного призначення – універсальні, відбілюючі, для виведення забруднень, антистатичні. Безфосфатні пральні порошки можуть використовуватися для прання речей білого й чорного кольору, різнокольорових, для делікатних тканин, вовни, дитячої білизни, спортивного одягу. Ємність упаковок безфосфатних порошків коливається від 350 г до 9 кг.

Встановлено, що в структурі найбільших торговельних мереж переважають безфосфатні порошки закордонного виробництва (рис. 5). Це підтверджує загальноєвропейські тенденції до охорони довкілля та зумовлює необхідність для вітчизняних виробників адаптувати асортимент і технології до нових вимог, зосередившись на розробці та виробництві екологічних пральних порошків для збереження конкурентоспроможності на ринку.

На основі аналізу рис. 5 встановлено, що з часткою 37% домінують безфосфатні пральні порошки вітчизняного виробництва. Це свідчить про успішну адаптацію українських компаній до сучасних екологічних стандартів та зростання попиту на продукцію національного виробництва. Другим за обсягом постачальником є Німеччина, яка займає 26% в структурі вищезазначених торговельних мереж. Це підкреслює високу довіру українських споживачів до німецької якості та технологій, що традиційно асоціюються з надійністю та ефективністю. Питома вага

досліджуваного товару, імпортована з Чехії, Польщі та Іспанії, сумарно становить 37%. Це вказує на конкурентну, хоч і меншу, присутність цих країн, що пропонують споживачам ширший вибір.

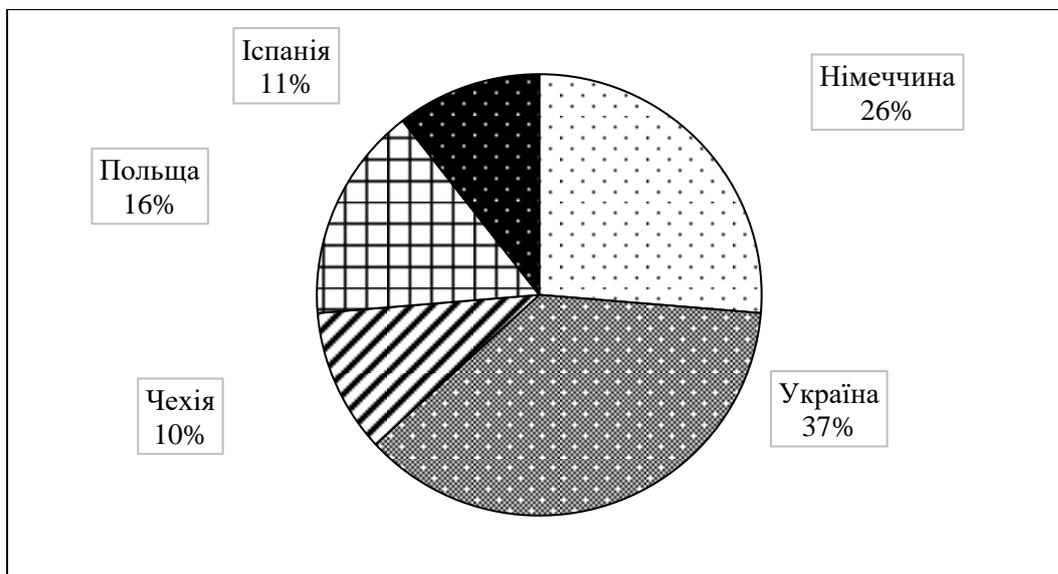


Рис. 5. Структура асортименту безфосфатних пральних порошків в найбільших торговельних мережах за країною походження, 2025 р.

Отже, на ринку України представлена продукція іноземного виробництва, хоча слід відмітити появу нових вітчизняних ТМ, що користуються значним попитом. Встановлено, що імпорт у декілька разів перевищує експорт пральних порошків. Асортимент пральних порошків представлений такими міжнародними виробниками як: Procter & Gamble, Henkel, Cussons, Unilever, Reckitt Benckiser. Однак, на ринку останнім часом досить високим попитом користуються пральні порошки вітчизняних виробників, а саме: представлені також вітчизняні ТМ: ТМ Вухастик, Alles GUT!, WASCHKONIG та Gala, Ariel, Persil (ТОВ PROCTER & GAMBLE Україна) тощо. Основна частка пральних порошків імпортується з Польщі, Німеччини та Чехії, а українська продукція експортується, в країни близького зарубіжжя, серед яких провідні місця займають Молдова та Болгарія.

Підсумовуючи, можна стверджувати, що ринок безфосфатних пральних порошків в Україні є досить конкурентним, але з чітко вираженим лідером. Позиція України як провідного виробника в цьому сегменті є позитивним індикатором розвитку вітчизняного виробництва.

Однак, значна частка імпорту з Німеччини свідчить про високий рівень зовнішньої конкуренції, що стимулює українські підприємства до постійного вдосконалення та інновацій. На додаток, ринок безфосфатних пральних порошків в Україні розвивається під впливом глобальних екологічних тенденцій. Ця необхідність виробляти екологічну продукцію змушує вітчизняні підприємства не лише вдосконалювати компонентний склад, але й інвестувати в технології, які мінімізують негативний вплив на довкілля.

Зростаюча свідомість споживачів щодо екологічних проблем стимулює попит на більш безпечні та ефективні засоби для прання. На даному етапі дослідження необхідно вивчити споживчі переваги щодо пральних порошків. Зокрема, з'ясувати, які критерії є вирішальними у виборі пральних порошків та як споживачі оцінюють показники якості останніх. Було проведено опитування серед 136 респондентів з використанням Google Forms. У ході соціологічного дослідження опитано споживачів пральних порошків, серед яких 91% – жінки (121), 9% – чоловіки (12). За віком вони розподілилися на 3 категорії: 18–30 років – 72% загальної кількості, 31–50 років – 23%; 51 рік і більше – 5%. За розміром середньомісячного доходу серед респондентів 18% отримують до 10 000 грн/міс., 56% – до 25 000 грн/міс., 26% – більше ніж 25 000 грн/міс. Також, було проведення опитування споживачів на пріоритетність уподобань у виборі пральних порошків, результати якого наведені на рис. 6.

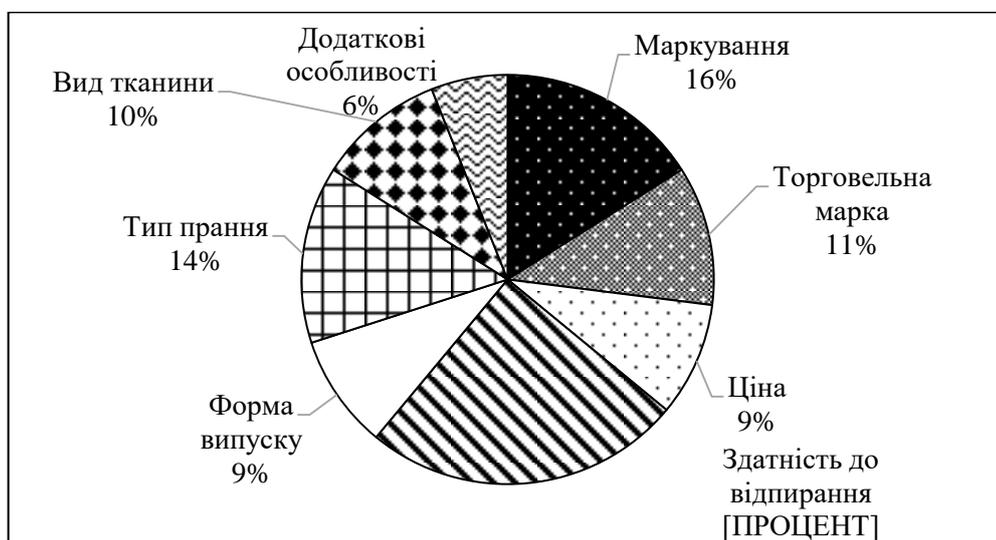


Рис. 6. Пріоритетність уподобань споживачів у виборі пральних порошків, 2025 р.

Встановлено, що найбільшу вагу для споживачів у виборі має здатність до відпирання, яка становить 25% від загальної структури. Це свідчить про те, що для споживачів першочерговим є досягнення якісного результату — чистого одягу.

Другим за значущістю фактором є маркування. Це може бути пов'язано з посиленням уваги споживачів до інформації про склад, виробника та інструкції щодо використання, що відображає зростання рівня обізнаності.

Група факторів, що займають значні, але не домінуючі позиції, включає тип прання (14%) та торговельна марка (11%). Важливість типу прання (ручне чи машинне) підтверджує, що функціональність товару є ключовою. Значна частка фактору «торговельна марка» свідчить про значущість бренду та довіру до відомих виробників, що може спрощувати процес прийняття рішення для споживача.

До факторів з найменшою значущістю відносяться ціна (9%), форма випуску (9%), вид тканини (10%) та додаткові особливості (6%). Відносно низька частка ціни свідчить про те, що для більшості споживачів якість (ефективність та придатність для певного виду тканини) є важливішою, ніж вартість. Низькі показники для форми випуску та маркування вказують на те, що ці критерії є менш пріоритетними при прийнятті остаточного рішення.

Разом із тим, важливо відзначити, що такі важливі критерії, як гіпоалергенність, вміст ензимів, БАР та інші екологічні чи безпекові аспекти, які віднесені до фактору додаткові особливості (6%), мають найменший вплив на рішення про купівлю. Цей низький показник може свідчити про недостатній рівень обізнаності споживачів щодо впливу хімічного складу пральних засобів на власне здоров'я та навколишнє середовище. Наголошення на перевагах безфосфатних, гіпоалергенних та біорозкладних компонентів може підвищити їхню значущість в очах споживачів і, як наслідок, стимулювати зростання попиту на екологічно безпечні продукти. Таким чином, це стане важливим для подальшого розвитку ринку та популяризації відповідального споживання.

В результаті соціологічного опитування встановлено, що найкращий рейтинг за 5-бальною шкалою мають пральні порошки, ТМ Ariel, Persil, Gala, DeLaMark, TORTILLA та Grunwald (рис. 7).

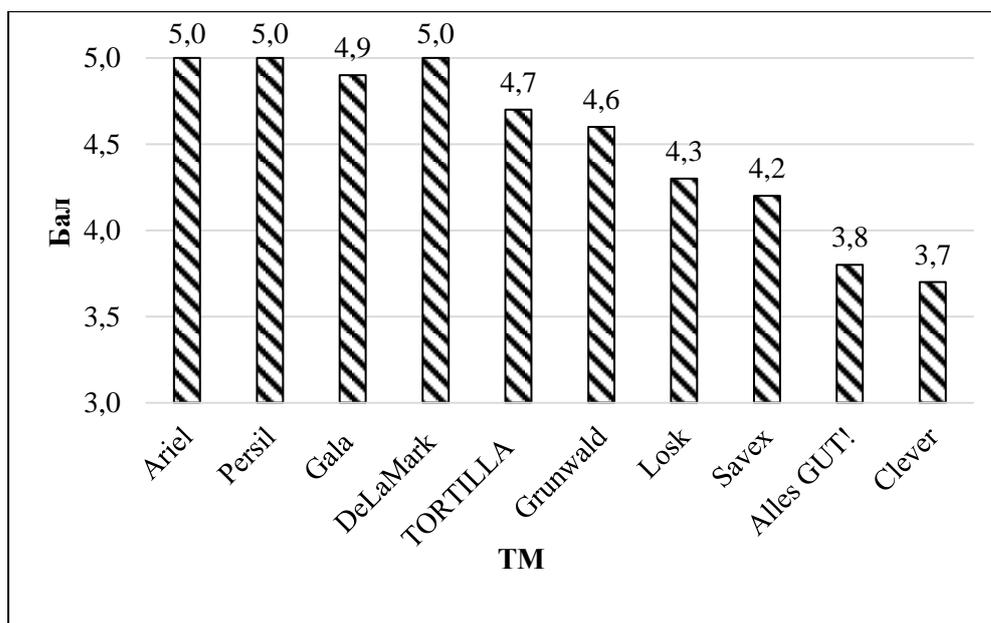


Рис. 7. Рейтинг ТМ пральних порошків серед опитаних споживачів, 2025р.

Згідно аналізу встановлено досить високий попит на пральні порошки ТМ Losk та Savex. Вони отримали оцінку 4,3 та 4,2 відповідно, від споживачів. Виявлено, що 62% споживачів звертають увагу на склад пральних порошків. Це свідчить про свідомість споживачів у виборі пральних порошків [26].

Одним з ключових факторів у виборі пральних порошків є вид тканини, оскільки різні тканини мають різну структуру і вимагають різного догляду. Тому виробники пральних порошків проводять

численні дослідження, щоб встановити фактори, які є найбільш значущими для кожного виду тканини. У зв'язку з цим до анкетування були включені питання, що стосувалися важливості вибору видів тканин, які найчастіше забруднюються.

Результати опитування наведені на рис. 8.

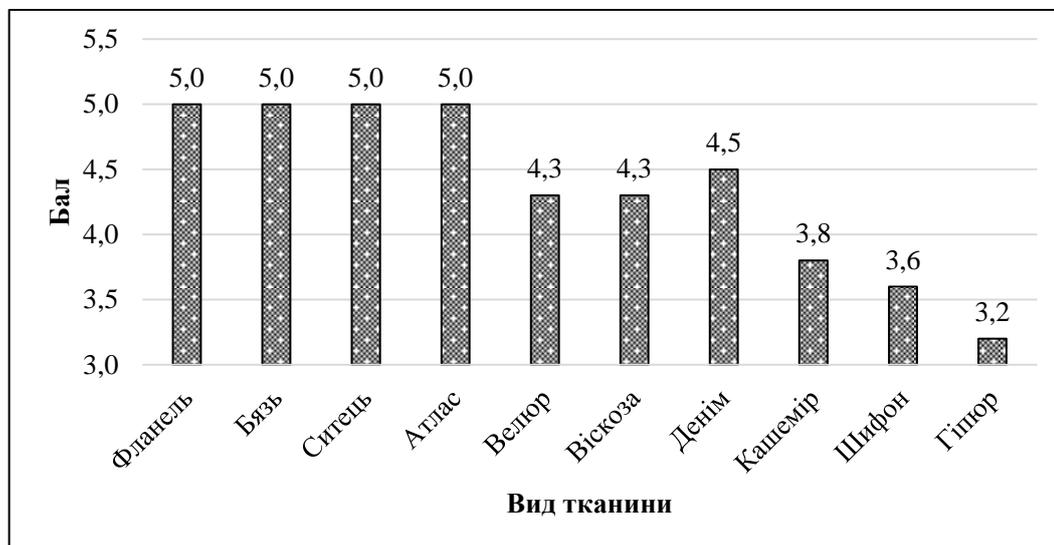


Рис. 8. Рейтинг видів тканин, що найчастіше піддаються забрудненням, серед опитаних споживачів, 2025р.

Встановлено, що в побуті споживачі найчастіше стикаються із забрудненням бавовняних (фланель, ситець, бязь) та шовкових (атлас) тканин. Тому, на даному етапі дослідження доцільним буде навести результати соціологічного опитування, що стосується найпоширеніших видів забруднень вищезазначених тканин серед споживачів. Результати опитування наведені на рис. 9.

Аналіз результатів опитування виявив найбільш поширені види забруднень для різних видів тканин. На бавовняних тканинах найчастіше зустрічаються харчові забруднення (кава, чай, соки, жир), забруднення від трави, крові та вина. Це пов'язано з широким використанням бавовняних тканин у повсякденному житті. Для синтетичних характерними забрудненнями є плями від косметики (туш, губна помада), дезодорантів, а також сліди від ручки та маркера. Такі тканини часто використовують для спортивного та повсякденного одягу, що пояснює специфіку забруднень.

На вовняних тканинах основними проблемами є жирові плями, плями від поту тощо. Ці забруднення вимагають делікатного видалення, щоб зберегти структуру та зовнішній вигляд вовняних виробів. Окрім основних видів забруднень, для кольорових тканин актуальною проблемою є збереження яскравості кольору. Респонденти відзначали втрату кольору тканин та появу сірого відтінку після прання, зниження насиченості тону.

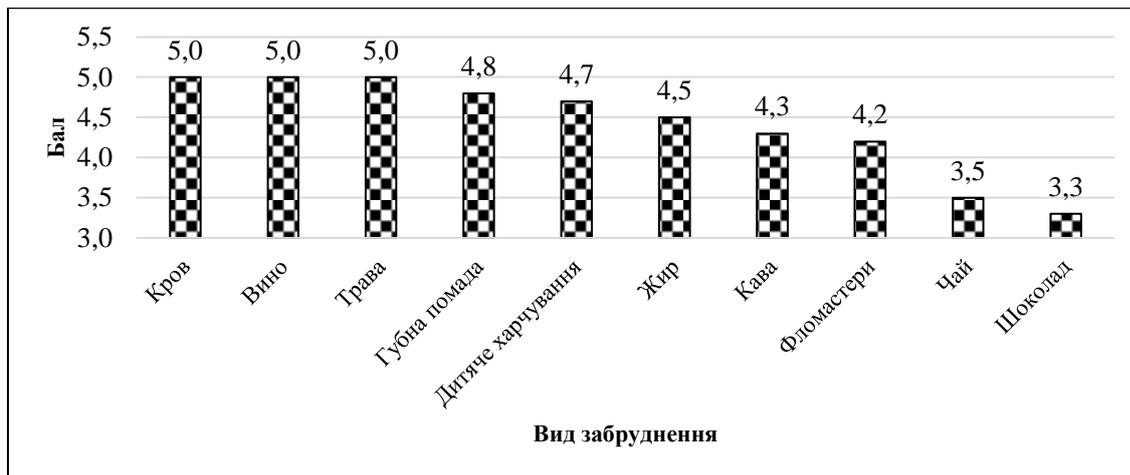


Рис. 9. Рейтинг найбільш поширених видів забруднень для різних видів тканин, серед опитаних споживачів, 2025р.

Споживачі стикаються з широким спектром забруднень, які залежать від виду тканини, способу життя та інших факторів. Це свідчить про те, що пральні порошки на даний момент, повинні бути універсальними та ефективно справлятися з різними забрудненнями. Близько 30% опитаних зазначили, що хотіли б бачити на ринку більше пральних порошків з використанням БАР. Аналіз за віковими групами показав, що молодь більш схильна обирати пральні порошки в інтернеті, тоді як люди старшого покоління віддають перевагу традиційним форматам. Соціальні мережі та рекомендації друзів виявилися основними джерелами інформації про пральні порошки для більшості респондентів [10, 26].

Отже, згідно опитування споживачів встановлено, що найкращий рейтинг у споживачів мають пральні порошки ТМ Ariel, Persil, Gala, DeLaMark, TORTILLA та Grunwald. Респонденти високо оцінили ефективність видалення плям цими порошками на різних видах тканин. Найчастіше забруднюються бавовняні (фланель, ситець, бязь) та шовкові (атлас) тканини.

Найбільш поширеними видами забруднень є вино, кров, трава, губна помада та дезодорант. Це дозволило вивчити споживчі переваги щодо вибору пральних порошків. Встановлено, що соціологічними факторами вибору останніх є інформація на упаковці, рекомендації асистента в торгівлі, рекламні матеріалами та вартість товару, поради знайомих, середньомісячний дохід та популярність бренду. Соціальні мережі відіграють все більшу роль у формуванні думки споживачів, тому рекомендації блогерів та інфлюенсерів можуть значно вплинути на їхній вибір.

Вимоги, які споживачі висувають до якості пральних порошків, ґрунтуються на технологічних факторах останніх. Тому, формувати вибір споживача можна через комплексний підхід у поєднанні зрозумілого інформування про технологічні фактори товару та соціальні уподобання споживачів.

Аналіз демонструє, що споживачі керуються функціональними характеристиками прального порошку, такими як ефективність та відповідність виду тканини. Емоційні та вторинні фактори, як бренд і ціна, хоча й важливі, але не є вирішальними. Це підкреслює, що виробникам слід зосередитися на поліпшенні основних властивостей товару, щоб задовольнити запити цільової аудиторії [26].

Технологічні фактори є складовою частиною комплексного підходу до формування споживчої поведінки у виборі товару. Тому, постає необхідність оцінки якості пральних порошків як одного із технологічних факторів.

Враховуючи результати соціологічного опитування обрано найбільш поширені ТМ пральних порошків: зразок №1 – ТМ Ariel (Аква-пудра. Яскраві кольори); зразок №2 – ТМ Persil (Expert color. Freshness); зразок №3 – ТМ DeLaMark (Professional) – безфосфатний; зразок №4 – ТМ TORTILLA (Еко Універсальний) – безфосфатний; зразок №5 – ТМ Gala (Аква-пудра. Французький аромат – ручне прання (РП)); зразок №6 – ТМ Grunwald (Універсальний) – безфосфатний; зразок №7 – ТМ Gala (Аква-пудра. Французький аромат – прання в пральній машині (МП)).

Зразки позиціонуються виробниками як універсальні (для різних типів прання). Для ТМ Gala було відібрано два види зразків: для РП та МП. Такий вибір був обумовлений відсутністю в асортименті виробника універсальних порошків. Дослідження оцінки якості пральних порошків включало три етапи: аналіз маркування, органолептичну оцінку та оцінку фізико-хімічних показників.

Аналіз результатів табл. 1 встановив відповідність зразків пральних порошків відповідають вимогам Технічного регламенту мийних засобів [2] щодо маркування. На упакованні зазначено: назву та торговельну марку, виробника та його адресу, склад, призначення, умови використання, масу, дату виготовлення, термін придатності та умови зберігання.

Органолептична оцінка виконана згідно вимог ДСТУ 2972:2010 [12] за показникам: зовнішній вигляд, колір та запах. Достовірність органолептичної оцінки пральних порошків підтверджено умовами проведення досліджень. Результати дослідження наведені у табл. 2.

Аналіз фізико-хімічних показників виконано згідно з вимогами ДСТУ 2972:2010 [12] (табл. 3) за показниками: розчинність у гарячій/холодній воді, водневий показник, піностійкість, піноутворювальна здатність.

Всі досліджувані зразки відповідають вимогам ДСТУ 2972:2010 [13]. Найкраща розчинність у гарячій воді відмічена для зразків 1 та 7. Водневий показник рН для всіх однаковий, окрім зразка 6. Піностійкість найкраща у зразків 1 та 2, а піноутворювальна здатність – для зразків 5 та 7.

Таблиця 1. Аналіз маркування пральних порошків

Показник	Зразок						
	№1	№2	№3	№4	№5	№6	№7
ТМ	Ariel	Persil	DeLaMark	TORTILLA	Gala (ПІ)	Grunwald	Gala (МІ)
Призначення	Для прання виробів зі змішаних тканин	Для всіх видів тканин, окрім шовку та вовни					
Склад	5-15% Аніонні ПАР, <5% неіоногенні ПАР, відбілювачі, фосфонати, полікарбоксилати, цеоліти, ензими, ароматизатори	5-15% аніонні ПАР, <5% неіоногенні ПАР, фосфонати, полікарбоксилати, цеоліти, ароматизатори, ензими	Оптичний відбілювач (<0,01%) парфумерна композиція (<0,15%) Лимонна кислота (<5%) Ферменти (<0,1%) антиресорбенти (<1%) Неіоногенні ПАР (<5%) Бікарбонат натрію (5-15%) Мило на основі натуральних речовин (5-15%) Кисневий відбілювач (5-15%) Сіль кухонна (15-30%) Карбонат натрію (20-30%)	<5%: неіоногенні ПАР аніонні ПАР 5-15% кисневмісний вибілювач 15-30% карбонати >30%: електроліти, ароматизатор піногасник антиресорбенти оптичний вибілювач комплексують і активатор ТАЕД силікати	5-15% аніонні ПАР, <5% неіоногенні ПАР, полікарбоксилати, ензими, оптичні відбілювачі, ароматизатори, гексилкоричний альдегід	< 5 % ТАЕД, запашники 5-15% силікат натрію; 15-30% карбонат натрію >30% хлорид натрію	5-15% аніонні ПАР, <5% неіоногенні ПАР, полікарбоксилати, ензими, оптичні відбілювачі, ароматизатори, гексилкоричний альдегід
Адреса	Проктер енд Гембл-Ракон, с.р.о., Оттова	«Хенкель Польща Оперейшенз», 02-672, м.	ТОВ «ДЕЛА МАРК», м.Київ, вул.	ГК «Сирена», вул. Бережанська, 9, м. Київ,	ТОВ «Проктер енд Гембл Україна», 08304, Київська	ТІП ТОВ «Велвет Біс», 85-825, м. Бидгощ,	ТОВ «Проктер енд Гембл Україна», 08304,

Продовження табл. 1

	402, 269 32 Раковні к, Чехія	Варшав а, вул. Домані євська, 41, Польщ а	Коновал ьця Євгена, будинок 36Б, Україна	04074, Україна	обл., м. Бориспіл ь, вул. Завокзал ьна, 2, Україна	вул. Войськ а Польск его, 65, Польщ а	Київськ а обл., м. Бориспі ль, вул. Завокза льна, 2, Україна
Умови викори стання	Не допускати потрапляння в очі, використовувати засоби індивідуального захисту. У разі потрапляння в очі – промити водою протягом 10-15 хв. Берегти від дітей						
Маса нетто, г	300	300	350	400	300	350	300
Дата вигото влення	07.03.25	12.02.2 5	18.04.25	09.01.25	10.02.25	15.05.2 5	05.06.25
Термін придат ності, міс.	24	36	60	36	24	60	24
Умови зберіга ння	при температурі не вище 35°C та відносній вологості повітря не більше 95%						

Враховуючи соціологічне опитування дослідження здатності пральних порошків до відпирання забруднень здійснено з урахуванням найбільш розповсюджених плям: губна помада, трава, вино, кров та дезодорант.

Здатність пральних порошків відпирати забруднення оцінена експертною групою у кількості 4 особи. Всі є спеціалістами оцінювання якості непродовольчих товарів та співробітниками кафедри товарознавства та митної справи ДТЕУ.

Ефективність здатності пральних порошків у видаленні різних видів забруднень оцінювали за розробленою 5-бальною шкалою:

- 5 – відмінно видалляє плями без попереднього замочування;
- 4 – залишає ледь помітні сліди;
- 3 – потребує попереднього замочування;
- 2 – залишає видимі плями;
- 1 – не видалляє забруднення.

Здатність відпирати забруднення оцінювали за результатами РМ та ПМ (при 30°C, така температура була обрана згідно з рекомендаціями до кожного виду тканини). За результат брали середнє арифметичне балів всіх експертів в залежності від виду забруднень та виду тканини для кожної ТМ.

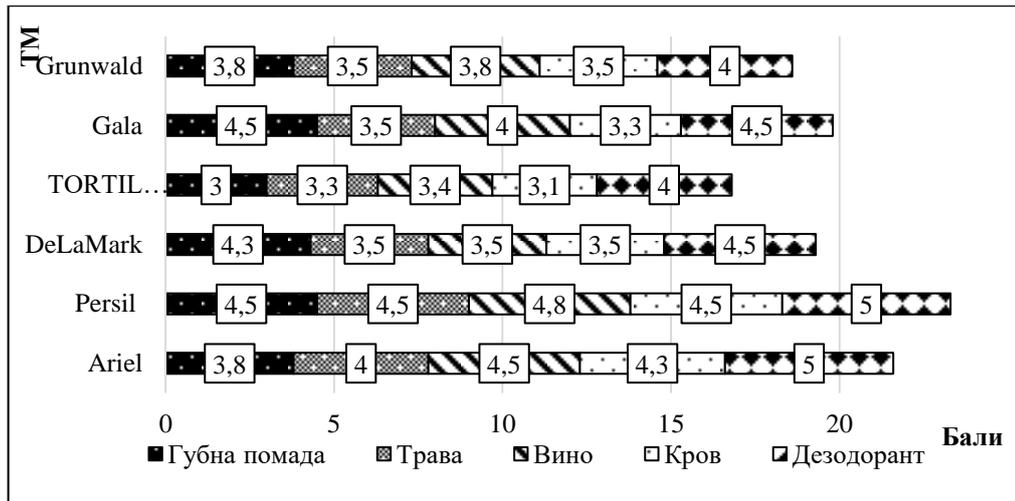
Таблиця 2. Органолептична оцінка пральних порошків

Показники	Норма згідно з ДСТУ 2972:2010	Зразок						
		№1	№2	№3	№4	№5	№6	№7
Зовнішній вигляд	Порошок крупнозернистий чи дрібнозернистий, допускається наявність кольорових гранул	Порошок крупнозернистий, присутні різнокольорові гранули	Порошок крупнозернистий, присутні різнокольорові гранули	Порошок з гранулами різного розміру, наявні гранули блакитного кольору	Порошок дрібнозернистий, наявні грудочки	Порошок дрібнозернистий, наявні гранули блакитного кольору	Порошок дрібнозернистий, наявні гранули зеленого кольору	Порошок дрібнозернистий, наявні гранули блакитного кольору
Колір	Відповідає кольору, зазначеному на упакованні, білий	Білий						
Запах	Відповідає запаху, зазначеному на упакованні, не різкий	Приємний запах свіжості, не різкий	Приємний запах квітів, не різкий	Без запаху	Без запаху	Приємний запах парфумів, не різкий	Приємний запах квітів, не різкий	Приємний запах парфумів, не різкий

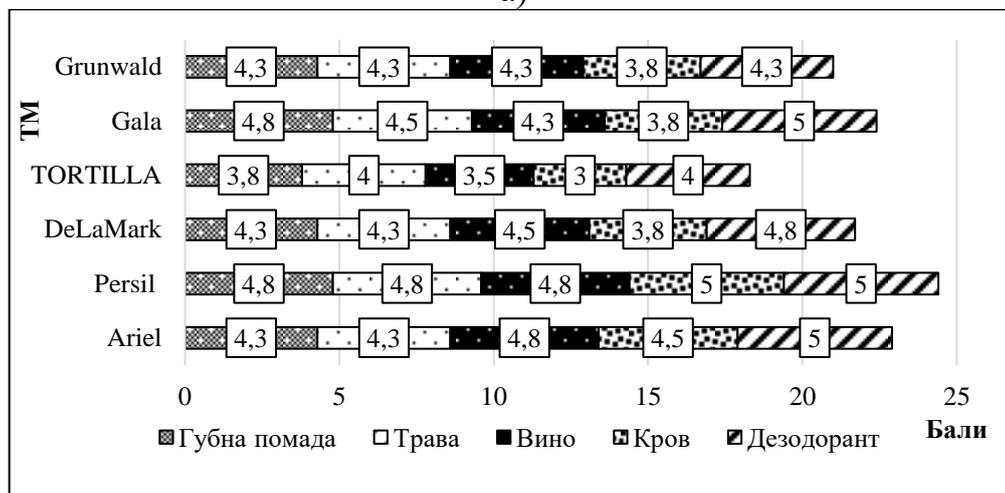
Таблиця 3. Фізико-хімічні показники пральних порошків

Показник	Зразок						
	№1	№2	№3	№4	№5	№6	№7
Розчинність у гарячій/холодній воді, хв	1,5 хв / 8 хв	1 хв / 6 хв	3 хв / 9 хв	3 хв / 8 хв	1,5 хв / 7 хв	2 хв / 9 хв	1 хв / 6 хв
Водневий показник рН	10	10	10	10	10	11	10
Піностійкість, %	76, 6%	76, 9%	60, 6%	61, 5%	72, 7%	62, 7%	71, 4%
Піноутворювальна здатність, см	4,2	5,1	3,0	2,1	7,2	2,9	7,3

Оцінку здатності пральних порошків відпирати забруднення на атласі зображено на рис. 10.



а)

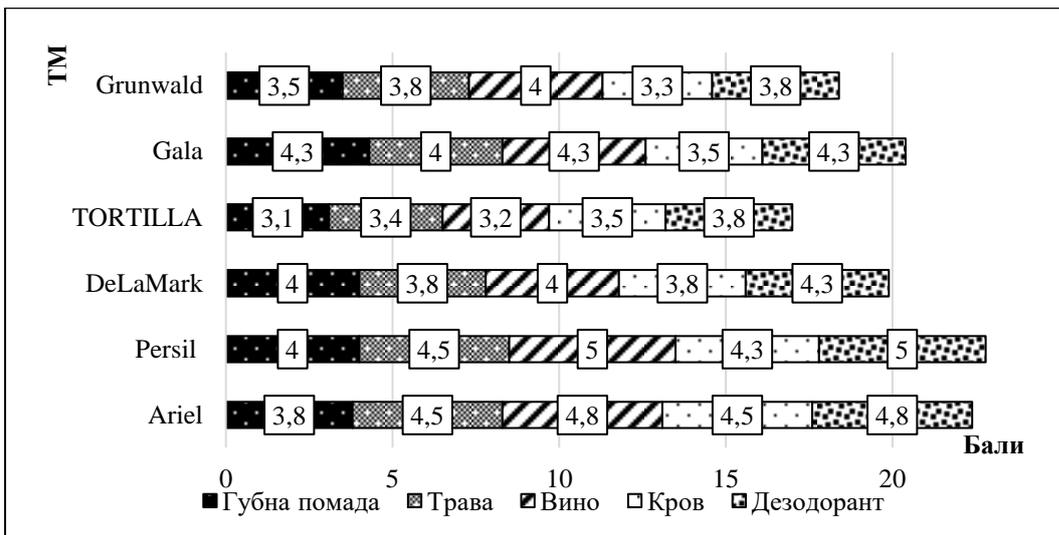


б)

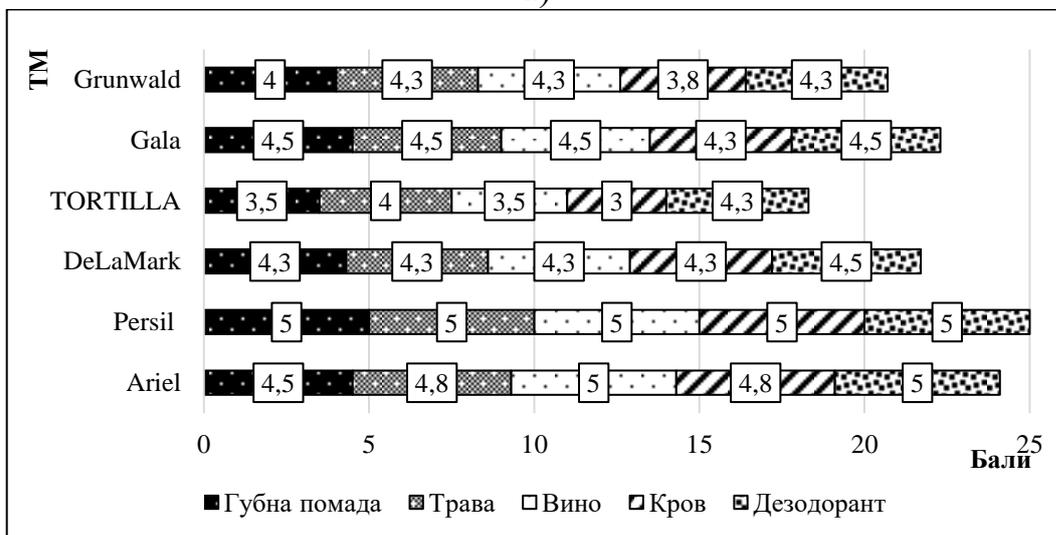
Рис. 10. Оцінка досліджуваних зразків атласу: а) – РП; б) – МП

Найефективнішим пральним порошком є зразок ТМ Persil, незалежно від виду прання та забруднення. Однак, необхідно зазначити, що після РП вищезазначений пральний порошок найкраще видаляє з атласу дезодорант, а після МП – кров та дезодорант. Також досить ефективними для РП є пральні порошки ТМ Ariel та Gala. Найменш ефективним виявився пральний порошок ТМ TORTILLA, він найгірше відіправ усі види забруднень із досліджуваних тканин.

Оцінку здатності пральних порошків відпирати забруднення досліджуваних зразків на фланелі наведено на рис. 11.



а)

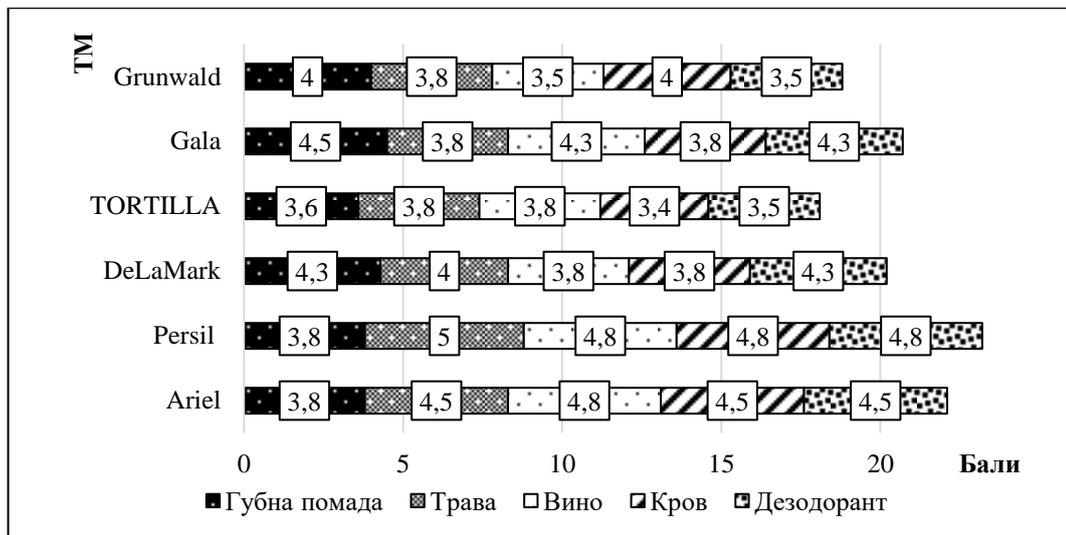


б)

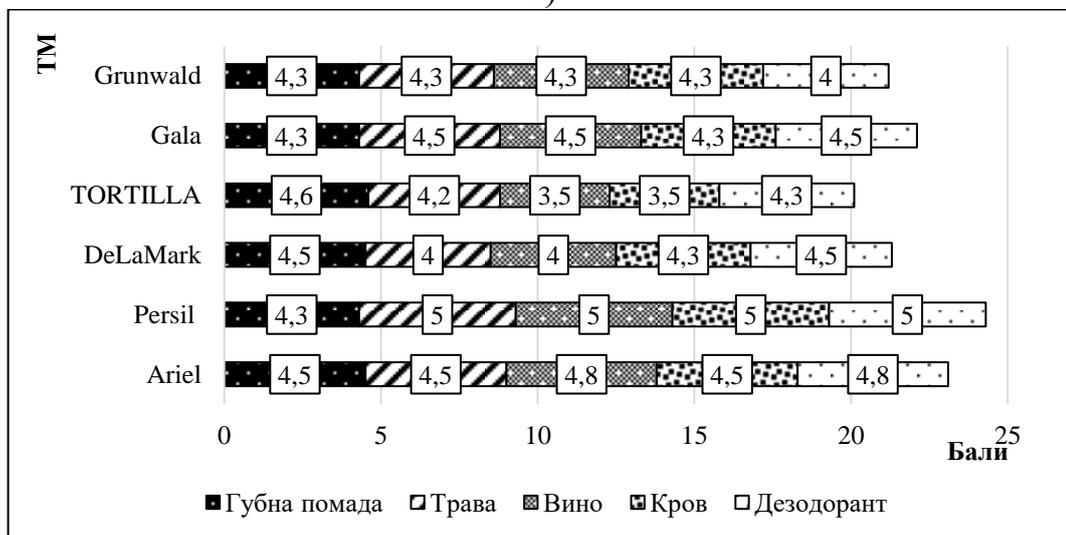
Рис. 11. Оцінка досліджуваних зразків фланелі: а) – РП; б) – МП

Встановлено, що найкраще видаляє плями з фланелі пральний порошок ТМ Persil. Всі види плям повністю відіпралися після МП досліджуваних зразків. ТМ Ariel, DeLaMark та Gala після РП та МП на зразку тканини залишилися ледь помітні сліди від плям, що також засвідчує про досить високу здатність пральних порошків відпирати забруднення. Пральний порошок ТМ TORTILLA взагалі не видалив плями після РП, а після МП було помітно видимі забруднення. Це свідчить, що даний пральний порошок є неефективним для прання фланелевих тканин.

Результати оцінки здатності пральних порошків відпирати забруднення досліджуваних зразків на ситці наведені на рис. 12.



а)



б)

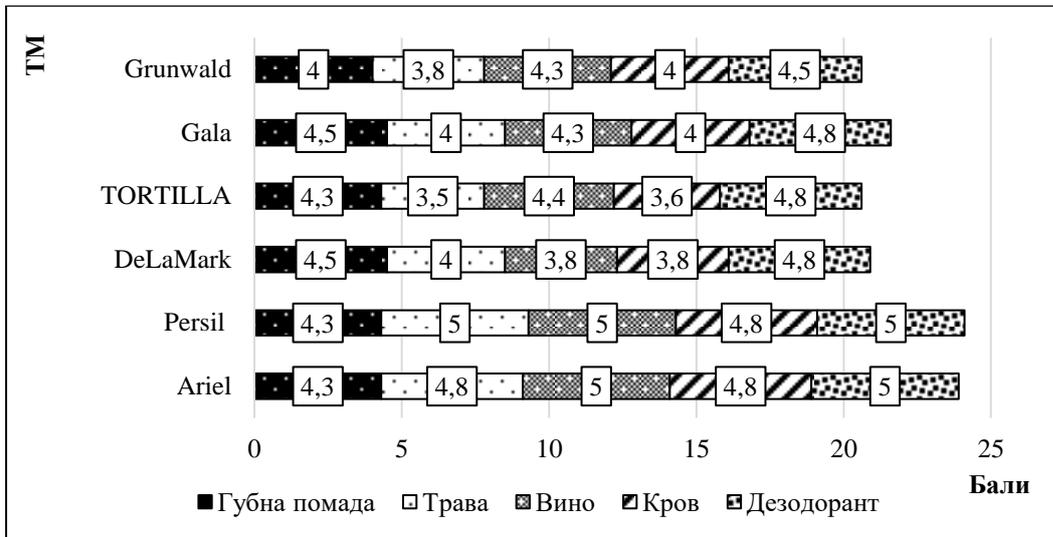
Рис. 12. Результати оцінки досліджуваних зразків ситцю: а) – РП; б) – МП

Результати досліджень показали, що в даному випадку прослідковується тенденція, аналогічна до досліджень зазначених зразків на тканинах із шовку та фланелі.

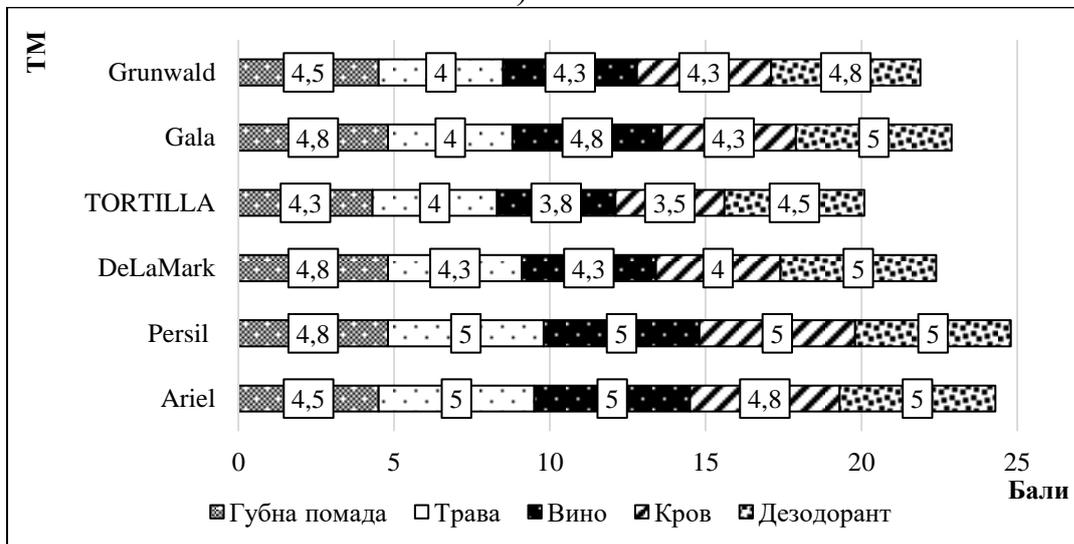
У випадку зразка із ситцю найефективнішим пральним порошком виявився зразок ТМ Persil. Останній повністю відіправ плями трави, вина, крові та дезодоранту на ситцевій тканині після прання в пральній машинці.

Плями губної помади були ледь помітними після прання. Окрім того, майже відіпралися вищевказані плями пральним порошком ТМ Ariel. найменш ефективним виявився пральний порошок ТМ TORTILLA, він майже не відіправ плями губної помади, трави, вина та крові після РП. Однак після МП плями майже відіпралися, хоча й залишилися ледь помітні сліди. Досить непогану здатність відпирати забруднення мали пральні порошки ТМ DeLaMark, Gala та Grunwald. Вони також не повністю відіпрали плями, однак були досить ефективними для РП та МП.

Результати оцінки здатності пральних порошоків відпирати забруднення досліджуваних зразків на бязі наведені на рис. 13.



а)



б)

Рис. 13. Результати оцінки досліджуваних зразків бязі: а) – РП; б) – МП

Встановлено, що після ПМ досліджуваних зразків бязі найбільш ефективним пральним порошком також виявився ТМ Persil. Після РП останній повністю відіправ траву, вино та дезодорант. У даному випадку також ефективними були пральні порошки ТМ Ariel, DeLaMark та Gala. Аналогічно є ситуація і з найгіршим зразком – ТМ TORTILLA. Останній майже не відіправ ніякі види плям, окрім дезодоранту.

За результатами аналізу ринку та опитування споживачів для оптимізації управління асортиментом пральних порошків було розроблено матрицю BCG (рис. 14).

Аналіз рис. 14 показав, що до Дійних корів (Cash Cows) належать Gala, Ariel та Persil. Ці бренди є відомими і мають усталену репутацію. Споживачі довіряють їх якості, що забезпечує стабільний попит.

До категорії Зірки (Stars) належать торговельні марки безфосфатних порошків – TORTILLA, Grunwald та DeLaMark. Ці бренди є новішими на

ринку, але завдяки інноваційним формулам та акценту на екологічності, вони активно завоюють популярність у споживача.

До категорії Знаки питання (Question Marks) належать наступні торговельні марки: Alles GUT!, UIU та Clever (рис. 14). Ці бренди можуть бути відносно новими або нішевими. Їхній потенціал високий, але вони потребують активного маркетингу та інвестицій.

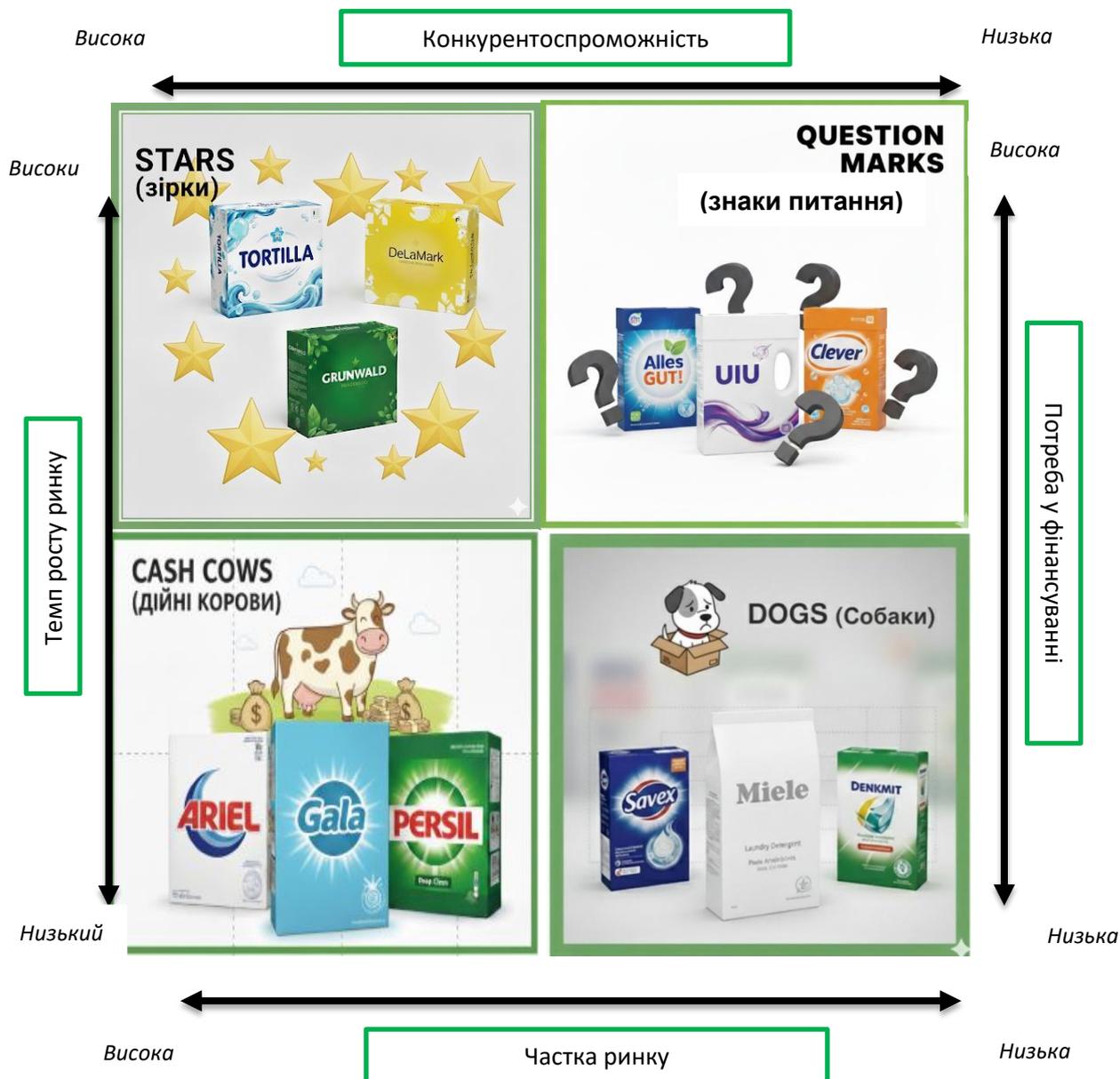


Рис. 14. Матриця BCG управління асортиментом пральних порошків

За результатами дослідження, до категорії Собаки (Dogs) належать пральні порошки торговельних марок Savex, Miele та Denkmitt. Ці бренди можуть бути менш популярними на ринку або мати застарілий імідж, що призводить до низького попиту.

За результатами опитування респондентів та дослідження показників якості пральних порошків було проведено SWOT-аналіз управління асортименту останніх (рис. 15).



Рис. 15. SWOT-аналіз управління асортиментом пральних порошків

В результаті SWOT-аналізу встановлено сильні сторони управління асортиментом пральних порошків. Сучасні пральні порошки ефективно видаляють різні види забруднень, що є ключовою перевагою для споживачів. На ринку присутні відомі бренди, які завоювали довіру споживачів. Існує широкий вибір пральних порошків для різних потреб: для кольорових, білих тканин, для дитячого одягу, з різними ароматами та в різних формах.

Слабкі сторони управління асортиментом полягають в тому, що порошкоподібні пральні порошки можуть залишати сліди на одязі, особливо під час прання в холодній воді. Багато порошків містять фосфати та інші хімічні речовини, що шкодять навколишньому середовищу. Це негативно впливає на імідж бренду. В аспекті маркування пральних порошків на українському ринку синтетичних мийних засобів відсутній уніфікований підхід в ідентифікації призначення товару за жорсткістю води, видом тканини, забруднень, відбілювача та вмістом фосфатів.

Можливості полягають у зростанні попиту на біорозкладні, натуральні та гіпоалергенні компоненти пральних порошків, що відкриває нові можливості для створення інноваційних товарів. Розробка нових, більш ефективних складів, що краще розчиняються в холодній воді, або створення концентрованих продуктів, які займають менше місця, може стати конкурентною перевагою. Розробка додаткових розпізнавальних емблем дозволить споживачам краще орієнтуватися у

великій кількості пральних порошків і обрати найбільш ефективний засіб для своїх потреб. Такі емблеми зроблять інформацію доступною та зрозумілою з першого погляду.

Якщо розглядати загрози, то в даному випадку ринок пральних порошків характеризується насиченістю великою кількістю місцевих та міжнародних брендів, а також альтернативними форматами (гелі, капсули, рідкі засоби). Споживачі все частіше віддають перевагу рідким мийним засобам та капсулам через їхню зручність, що може призвести до зниження попиту на традиційні порошки. Законодавчі обмеження щодо використання певних хімічних компонентів змушують компанії змінювати рецептуру, що може вплинути на ефективність і собівартість.

Якість пральних порошків була комплексно оцінена з урахуванням вподобань споживачів та аналізу стратегічного позиціонування за допомогою BCG-матриці та SWOT-аналізу. Встановлено, що високі показники якості є сильними сторонами товару і корелюють із категорією Дійні корови у матриці BCG, оскільки такі порошки мають стабільний попит та генерують високий грошовий потік. Навпаки, нижчий рівень показників якості виступає слабкою стороною, що зумовлює віднесення таких пральних порошків до менш бажаних категорій Знаки питання або Собаки. Це сигналізує про потенційні проблеми з часткою ринку, зростанням або необхідністю значних інвестицій для покращення.

За результатами SWOT-аналізу та аналізу матриці для забезпечення споживчих вимог щодо пральних порошків доцільно розробити додаткове маркування з метою інформування споживачів про технологічні фактори товару. Це дозволить сформулювати розуміння споживачів щодо ефективності видалення плям пральними порошками. Такий підхід не тільки підвищить довіру до товару, але й допоможе споживачам підібрати оптимальний пральний порошок для їхніх потреб та сприятиме підвищенню конкурентоспроможності ТМ на ринку.

Спираючись на результати дослідження у виборі пральних порошків, постає необхідність розробки додаткових розпізнавальних емблем на маркуванні. Вони дозволять споживачам краще орієнтуватися у великій кількості пральних порошків і обрати найбільш ефективний засіб для своїх потреб. Такі емблеми зроблять інформацію доступною та зрозумілою з першого погляду.

В результаті опитування споживачів встановлено, що найважливішим критерієм вибору прального порошку є його здатність до відпирання забруднень.

На здатність до відпирання прального порошку впливає комплексна взаємодія кількох ключових факторів. Недостатність або відсутність одного з них може значно знизити ефективність прання.

Найважливішим фактором є хімічний склад прального порошку. Ефективність прання залежить від збалансованого співвідношення таких компонентів:

- ПАР: це основа будь-якого мийного засобу. ПАР руйнують

поверхневий натяг води, дозволяючи їй проникати в структуру тканини, відокремлювати бруд, жир і утримувати їх у розчиненому стані, запобігаючи повторному осіданню на білизні;

- «будівельники» - ці речовини, такі як фосфати (у звичайних порошках) або цеоліти та полікарбоксилати (в безфосфатних), пом'якшують воду, зв'язуючи іони кальцію та магнію. Це дозволяє ПАР працювати з максимальною ефективністю;

- ферменти (ензими) – це біологічно активні добавки, що розщеплюють специфічні види забруднень. Наприклад, протеази руйнують білкові плями (кров, молоко), ліпази — жирові, а амілази — плями від крохмалю.

- відбілювачі видаляють пігментні плями (від кави, чаю, фруктів). Кисневі відбілювачі, на відміну від оптичних, дійсно усувають забруднення, а не просто маскують їх, створюючи ілюзію білизни.

- додаткові компоненти (полімери) запобігають повторному осіданню бруду, інгібітори корозії, ароматизатори та інші речовини, що покращують кінцевий результат.

Не менш важливою є якість води, яка включає в себе жорсткість та температуру. Жорстка вода містить мінеральні солі, що зв'язують ПАР і знижують їхню ефективність. Якщо порошок не містить достатньо «будівельників», частина його мийних компонентів буде витрачена на пом'якшення води, а не на прання.

Висока температура прискорює хімічні реакції, підвищуючи ефективність прання. Однак, деякі компоненти, наприклад, ензими, можуть руйнуватися при дуже високих температурах, тому важливо дотримуватися рекомендацій виробника на упаковці.

Не менш важливою складовою є кількість порошку. Використання занадто малої кількості порошку знизить його відпиральну здатність, а надмірне дозування може призвести до залишення слідів на одязі та пошкодження тканини.

Правильний вибір режиму (тривалості, інтенсивності, температури) впливає на результат. Наприклад, для сильно забрудненої білизни потрібен довший цикл.

Проблема маркування пральних порошоків на українському ринку побутової хімії свідчить про відсутність уніфікованого підходу в ідентифікації призначення товару за видом тканини.

Аналіз продукції таких торговельних марок, як Ariel, Persil, Sila та Sodasan, демонструє, що виробники використовують різні символи для позначення ідентичних властивостей, зокрема, для прання вовни, бавовни чи синтетичних волокон.

Ця розбіжність у маркуванні спричиняє дезорієнтацію споживачів, особливо тих, які не володіють спеціалізованими знаннями у сфері побутової хімії. Нестандартизована система позначень ускладнює процес вибору прального порошку, що відповідає конкретним потребам споживача, і знижує ефективність комунікації між виробником та кінцевим користувачем.

Для подолання зазначених викликів пропонується розробити та впровадити універсальну систему графічних позначень. Зважаючи на значущість жорсткості води та її вплив на відпиральну здатність прального порошку, було прийнято рішення розробити емблеми, що допоможуть споживачам обрати товар, який буде ефективним у їхньому регіоні, залежно від жорсткості води (табл. 4).

Таблиця 4. Візуалізація емблем для прального порошку в залежності від жорсткості води

Емблема	Опис
 <p data-bbox="384 804 534 837">Soft Water</p>	<p data-bbox="970 580 1190 613"><i>Для м'якої води</i></p> <p data-bbox="719 618 1362 651">Дизайн: одна крапля води, напис «Soft Water».</p> <p data-bbox="687 656 1445 869">Пояснення: цей пральний порошок містить мінімальну кількість або не містить компонентів для пом'якшення води, оскільки вони тут не потрібні. Він ідеально підходить для регіонів, де вода від природи є м'якою. Це дозволяє споживачу не переплачувати за непотрібні йому компоненти.</p>
 <p data-bbox="284 1301 635 1335">Medium Hardness Water</p>	<p data-bbox="855 882 1305 916"><i>Для води середньої жорсткості</i></p> <p data-bbox="687 920 1445 987">Дизайн: дві краплі води, напис «Medium Hardness Water».</p> <p data-bbox="687 992 1445 1171">Пояснення: цей порошок є універсальним і розроблений для води з середньою жорсткістю, що є найпоширенішим варіантом у більшості міст. Він містить збалансовану кількість пом'якшувачів для ефективного прання.</p>
 <p data-bbox="373 1794 544 1827">Hard Water</p>	<p data-bbox="943 1375 1217 1408"><i>Для жорсткої води</i></p> <p data-bbox="719 1413 1353 1447">Дизайн: три краплі води, напис «Hard Water».</p> <p data-bbox="687 1451 1445 1704">Пояснення: цей порошок має посилену формулу, що містить велику кількість пом'якшувачів (наприклад, цеолітів або фосфатів). Він ефективно працює навіть у дуже жорсткій воді, запобігаючи утворенню накипу на нагрівальних елементах і зберігаючи якість прання. Це ідеальний вибір для регіонів з відомою проблемою жорсткої води.</p>

Відповідно до аналізу рН досліджуваних порошків, усім торговельним маркам пропонується використовувати емблему Soft Water (для м'якої води). У м'якій воді солей жорсткості майже немає. Таким чином, лужні компоненти пральних порошків (рН 10–11) не

витрачатимуться на боротьбу з жорсткістю. Уся їхня потужність буде спрямована виключно на підтримку високої здатності до відпирання забруднень. Також, в результаті соціологічного опитування споживачів встановлено, що у останніх виникають труднощі при відпиранні пральними порошками різних видів забруднень. Тому, запропоновано класифікацію, залежно від їх хімічної природи:

- косметичні;
- харчові;
- лікарські;
- побутові;
- забруднення від продуктів обміну.

У групі харчових забруднень можна виділити наступні підрозділи: забруднення жирового походження (соус, кров, масло), білкового (молоко, яйця), забруднення, які містять кислоти (вино, фрукти, ягоди) та забруднення від напоїв.

До косметичних забруднень відносяться ті, які виникають від косметичних препаратів. Сюди можна віднести: парфуми, помаду, туш для вій, лак для нігтів, рум'яна, креми для рук та обличчя, лак та гелі для укладання волосся, і багато іншого.

Забруднення від лікарських препаратів зазвичай мають забарвлення. До них відносяться забруднення від зеленки та йоду, риб'ячого жиру.

До категорії побутових забруднень можна відносити всі ті забруднення, які трапляються з нами в процесі відпочинку або роботи. Серед них: плями від трави, масла, іржі, клею, крему для взуття та ін.

Забруднення від продуктів обміну включають потовиділення, кров, слина, кров тощо.

В результаті аналізу найбільших торговельних мереж [21-25], що реалізують пральні порошки, було виявлено, що невелика частка виробників в окремих випадках наносять на пакування позначення, що інформує споживача про специфіку та призначення використання засобів (деякі види тканин та особливості пральних порошоків).

З метою подолання існуючих проблем, доцільним є розробити єдині графічні символи, що вказуватимуть на призначення прального порошку для конкретних видів тканин. Уніфікація маркування дозволить:

- зменшити час, необхідний для пошуку потрібного товару;
- забезпечити чітке та однозначне розуміння призначення прального порошку;
- створити єдиний стандарт, що спростить взаємодію між виробниками та споживачами на ринку.

У табл. 5 наведено запропоновані емблеми на маркуванні пральних порошоків, які вказують на ефективність засобу для конкретних видів забруднень.

На основі дослідження здатності до відпирання було встановлено,

що торгові марки Persil та Ariel є найефективнішими у видаленні всіх видів забруднень, тому для них доцільно застосувати універсальну емблему.

Таблиця 5. Візуалізація емблем для прального порошку в залежності від виду забруднень

Емблема	Опис
	<p><i>Для жирних плям (олія, майонез)</i></p> <p>Дизайн: білий об'яг, забруднений каплею жиру, напис «Grease buster» («Винищувач жиру»).</p> <p>Пояснення: ця емблема вказує на те, що порошок містить спеціальні компоненти (ліпази та сильні ПАВ), які розщеплюють жири та олії, роблячи їх легко вимивними.</p>
	<p><i>Для білкових плям (кров, молоко, яйце)</i></p> <p>Дизайн: зображення щита з літерою «Р» та каплями білкової природи, напис «Protein buster» («Винищувач протеїну»).</p> <p>Пояснення: ця емблема означає, що у складі порошку є ферменти протеази, які ефективно руйнують білкові забруднення.</p>
	<p><i>Для плям від фруктів та овочів (травя, сік)</i></p> <p>Дизайн: зображення фруктів та овочів на фоні води, напис «Fruits&Veggie buster» («Винищувач фруктів та овочів»).</p> <p>Пояснення: цей символ вказує на наявність пектинази та інших ензимів, які розщеплюють рослинні пігменти та плями від фруктів.</p>
	<p><i>Для пігментних плям (кава, чай, вино, косметика)</i></p> <p>Дизайн: схематичне зображення одягу з плямами кави та чаю, напис «Coffee&Tea» («Винищувач кави та чаю»).</p> <p>Пояснення: ця емблема вказує на наявність кисневих відбілювачів, що є ефективними у боротьбі з пігментними забрудненнями, не пошкоджуючи тканину.</p>
	<p><i>Універсальна емблема («Широкий спектр»)</i></p> <p>Дизайн: схематичне зображення сильної руки з мускулами, напис «Universal stain buster» («Універсальний винищувач плям»).</p> <p>Пояснення: ця емблема означає, що порошок містить комплекс ензимів та відбілювачів, що дозволяє йому боротися з різноманітними видами забруднень, включаючи плями від лікарських препаратів.</p>

Для засобів Gala, DeLaMark та Grunwald рекомендовано використовувати емблему, яка вказує на їхню спеціалізацію на пігментних та білкових плямах. У той же час, ТМ TORTILLA показала високу ефективність проти фруктово-овочевих і пігментних

забруднень, відповідно, для неї пропонуються відповідні емблеми. Також запропоновано розробити розпізнавальні емблеми для маркування пральних порошків, в залежності від виду тканини (згідно наукової класифікації [26]). Емблеми для видів тканин допоможуть споживачам не лише ефективно прати, але й зберегти одяг у гарному стані, запобігаючи його пошкодженню (табл. 6).

Таблиця 6. Візуалізація емблем для прального порошку в залежності від виду тканин

Емблема	Опис
	<p><i>Для бавовни та льону</i></p> <p>Дизайн: зображення квітки бавовни. Цей символ відразу асоціюється з натуральними, міцними тканинами, напис «Wash. Cotton&Linen. Extra clean» («Прання. Бавовна та льон. Екстра чистота»). Пояснення: ця емблема вказує на те, що порошок має сильний мийний склад, призначений для глибокого очищення міцних, стійких до зношування тканин. Ці порошки містять компоненти, що витримують високі температури прання (рН 10-11,5).</p>
	<p><i>Для делікатних тканин</i></p> <p>Дизайн: зображення вовни, напис «Delicate. Wool&Silk» («Бавовна та льон. Екстра чистота»). Ці символи асоціюються з м'якістю та ніжністю. Пояснення: ця емблема означає, що порошок має м'яку, делікатну формулу, яка не пошкоджує волокна ніжних тканин, таких як вовна, шовк, атлас або мереживо, рН 7-8,5.</p>
	<p><i>Для спортивного одягу</i></p> <p>Дизайн: символ пральної машини та спортивних речей, напис «Active clean» («Активна чистота»). Пояснення: ця емблема вказує на те, що порошок спеціально розроблений для синтетичних тканин, які часто використовуються у спортивному одязі.</p>
	<p><i>Універсальний</i></p> <p>Дизайн: символ сонце, що сходить над пінною водою, напис «Everclean». Пояснення: ця емблема вказує на те, що порошок призначений для прання різноманітних тканин, зокрема і хімічних волокон (рН 9-9,5).</p>
	<p><i>Для надмірно забруднених речей</i></p> <p>Дизайн: барабан пральної машини з водою та частинками бруду, напис «Power clean» («Сила чистоти»). Пояснення: ця емблема вказує на те, що пральний порошок призначений для прання грубих та надмірно забруднених тканин, зокрема спецодягу.</p>

Аналіз даних, представлених у табл. 6, чітко засвідчив, що показники рН досліджуваних зразків пральних порошків коливаються у лужному діапазоні, а саме в межах 10-11. Такий високий рівень лужності є типовим

для складів, розроблених для ефективного відпирання натуральних волокон і сильних забруднень. Зважаючи на це, для всіх цих ТМ доцільно нанести спеціалізовану емблему, що вказує на їхнє переважне призначення та безпечність використання для тканин із бавовни та льону. Це пояснюється тим, що високий рН покращує властивості мийних засобів для цих міцних волокон, допомагаючи краще видаляти жири та пігментні плями, при цьому не завдаючи шкоди їхній структурі. Водночас, ця рекомендація слугуватиме важливим орієнтиром для споживачів, попереджаючи їх про необхідність обережного використання цих порошків для делікатних тканин, таких як вовна чи шовк, для яких бажаним є нейтральний або слабокислий рівень рН.

Зважаючи на те, що все більшої популярності серед споживачів набувають екологічно чисті пральні порошки, доцільним буде розробити дизайн емблеми, за якою можна буде ідентифікувати пральний порошок, як екологічний. Це дуже важливо, адже прозорість щодо складу товару підвищує довіру споживачів.

Емблеми, за якими можна ідентифікувати пральний порошок, в залежності від виду відбілювача наведені у табл. 7.

Таблиця 7. Візуалізація емблем для прального порошку в залежності від виду відбілювача в його складі

Емблема	Опис
	<p><i>Кисневий відбілювач</i></p> <p>Дизайн: символ атома кисню (O) в барабані пральної машини, напис «With Oxygen Bleach» («З кисневим відбілювачем»). Це візуально демонструє, що відбілювання відбувається за рахунок хімічної реакції. Пояснення: ця емблема вказує, що порошок містить перкарбонат натрію, який при взаємодії з водою виділяє активний кисень. Він ефективно видаляє пігментні плями (від чаю, кави, вина, фруктів), дезінфікує і усуває неприємні запахи. Цей відбілювач є екологічно безпечним, розпадається на соду, воду та кисень.</p>
	<p><i>Оптичний відбілювач</i></p> <p>Дизайн: Зображення світлового променя, що б'є по тканині, або зірки, що сяє, напис «Optical Brightener». Це символізує ілюзію білизни. Пояснення: ця емблема означає, що у складі порошку є флуоресцентні частинки. Вони не видаляють бруд, а лише осідають на волокнах тканини і перетворюють невидиме ультрафіолетове випромінювання на видиме синє світло. Цей компонент не відпирає плями, а лише маскує їх, що може бути ключовим для споживачів.</p>

На основі аналізу даних табл. 7, встановлено чітку диференціацію щодо управління асортиментом: для ТМ Ariel, Persil та Gala доцільним є застосування на емблеми оптичний відбілювач,

оскільки їхні формули містять ці компоненти для досягнення візуального ефекту яскравої білизни. Водночас, для ТМ, що позиціонуються як екологічні – DeLaMark, Grunwald та TORTILLA варто застосувати емблему кисневий відбілювач.

Окремо слід звернути увагу, що в країнах ЄС вміст фосфатів у пральних порошках є недопустимим. Заборона або суттєве обмеження використання фосфатів у пральних порошках діє в багатьох країнах за кордоном, включаючи Німеччину, Австрію, Швейцарію, Норвегію, починаючи з 2002 року. Це пов'язано з їхньою шкідливістю для довкілля, оскільки фосфати спричиняють масове цвітіння синьо-зелених водоростей у водоймах, що призводить до екологічної катастрофи. Однак, в Технічному регламенті мийних засобів [2] вміст фосфатів є допустимим і становить не більше 5 %. При цьому, пральні порошки, які взагалі не містять фосфатів та містять останні у кількості – до 5%, на ринку однаково позиціонуються виробниками як безфосфатні.

Для того, щоб підвищити рівень обізнаності споживачів у даному напрямку, пропонуємо розроблені емблеми (табл. 8).

Таблиця 8. Візуалізація емблем для прального порошку для позначення вмісту фосфатів

Емблема	Опис
	<p><i>Безфосфатний порошок</i> Дизайн: зелене листя, білий одяг на фоні води, напис «Phosphate-Free» («Без фосфатів»).</p> <p>Пояснення: ця емблема є ключовою ознакою екологічного порошку. Вона гарантує, що у його складі немає фосфатів, які спричиняють цвітіння водойм. Замість них використовуються безпечніші компоненти, що не шкодять екосистемі.</p>
	<p><i>Порошок з низьким вмістом фосфатів</i> Дизайн: зелене листя, білий одяг з цифрою 5% на фоні води, напис «Less than 5% Phosphates» («Фосфатів менше 5%»).</p> <p>Пояснення: ця емблема гарантує, що у його складі є фосфати, однак вони присутні в мінімальній допустимій кількості.</p>

Аналіз даних, представлених у табл. 8, виявив значні відмінності у складі популярних пральних порошків щодо вмісту фосфатів, що визначає стратегію їхнього маркування. У складі ТМ Ariel, Persil та Gala встановлено наявність фосфатів, через що розроблені для екологічного позиціонування емблеми не можуть бути до них застосовані.

Водночас, для ТМ DeLaMark доцільно використовувати емблему безфосфатний порошок, що підкреслює її екологічність і безпечність складу.

Крім того, дослідивши хімічний склад порошоків ТМ Grunwald та TORTILLA, було визнано доцільним застосувати до них емблему порошок з низьким вмістом фосфатів, що засвідчує їхнє проміжне положення на ринку та відповідає сучасним вимогам зниження хімічного навантаження на довкілля.

Таким чином, емблеми з краплями (одна, дві, три) інформують споживача про здатність порошку ефективно працювати у воді різної жорсткості. Застосування емблем з краплями дозволять споживачеві не лише обрати оптимальний засіб, але й економити кошти, не купуючи дорожчий порошок з надлишковою кількістю пом'якшувачів, якщо в його регіоні вода м'яка. Наявність цих емблем також свідчить про те, що товар розроблено з урахуванням регіональних особливостей водопостачання, що є показником турботи про споживача.

Емблеми для відпирання плям, що класифікуються за хімічною природою (жирові, білкові, пігментні), забезпечують прозорість і ефективність. Вони інформують, що порошок містить спеціальні ензими (ліпази, протеази) та відбілювачі, що дозволяють цілеспрямовано боротися з конкретними видами забруднень. Така деталізація допомагає споживачу вирішити конкретну проблему, наприклад, видалити плями від жиру або крові, підвищуючи довіру до бренду як до експерта у сфері прання.

Емблеми для білих, кольорових і делікатних тканин є критично важливими для збереження якості одягу. Вони інформують, що порошок розроблений із урахуванням специфічних потреб різних матеріалів. Наприклад, емблема для білих речей гарантує, що у складі є відбілювачі, а для кольорових — їхня відсутність, що запобігає вимиванню кольору. Це дозволяє споживачу уникнути пошкодження улюблених речей та продовжити їхній термін експлуатації.

Остання група емблем зможе відобразити інноваційність та екологічну відповідальність торговельної марки прального порошку. Вони демонструють, що товар є не лише ефективним, але й безпечним для довкілля. Представлена інформація про відсутність фосфатів (або мінімальну допустиму їх кількість) та наявність кисневого відбілювача у складі прального порошку дозволить підвищити обізнаність споживачів в даній сфері та сформувані їх екологічну свідомість.

На основі вищезазначених результатів досліджень розроблено алгоритм, що є ключовим інструментом для оптимізації управління асортиментною СМЗ, зокрема, у сегменті пральних порошоків (рис. 16).

Впровадження алгоритму управління асортиментом СМЗ (пральних порошоків) матиме подвійний позитивний ефект: по-перше, він значно зорієнтує кінцевого споживача у складному та насиченому ринковому середовищі. Алгоритм пропонує чітку, науково обґрунтовану класифікацію (наприклад, за вмістом фосфатів, наявністю оптичних відбілювачів або екологічністю), що дозволяє споживачеві швидко та свідомо обирати товар, який максимально відповідає його потребам. Також розроблений алгоритм підвищує конкурентоспроможність як самих порошоків, так і підприємства в цілому. Точне маркування, засноване на

алгоритмі, формує довіру до бренду, зменшує маркетингові ризики та сприяє ефективнішому позиціонуванню товару на ринку.

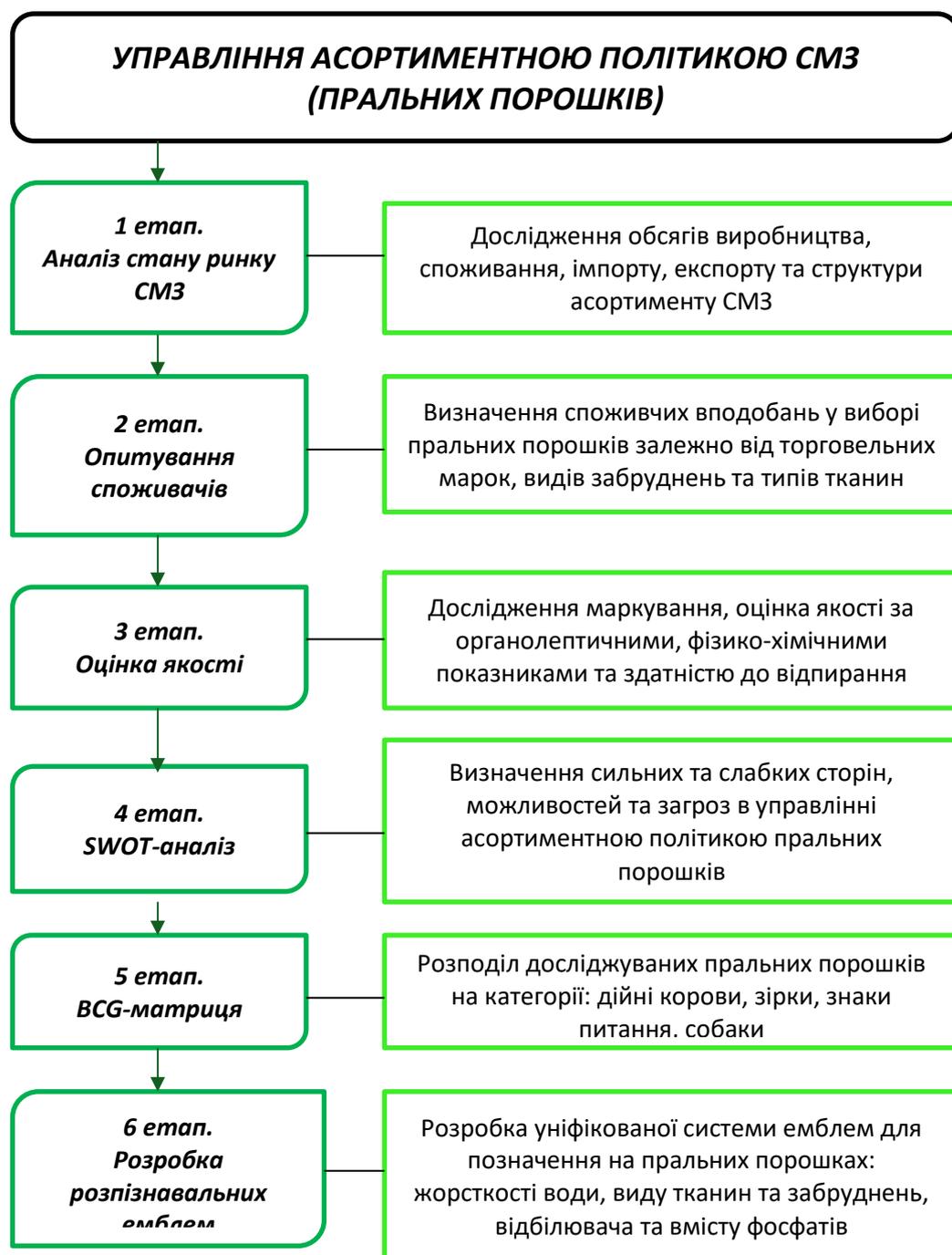


Рис. 16. Алгоритм управління асортиментом СМЗ (пральних порошків)

Висновки. Встановлено, що ринок пральних порошків в Україні характеризується значною присутністю міжнародних корпорацій, таких як Procter & Gamble, Henkel та Unilever. Пральні порошки вітчизняного виробництва займають меншу частку, порівняно з імпортними. Це пов'язано з повномасштабним вторгненням в Україну у 2022 році. Однак, протягом останніх трьох років спостерігається тенденція збільшення обсягів експорту пральних порошків до Румунії, Молдови та Польщі. Це

свідчить про високу якість вітчизняних пральних порошків та їх здатність конкурувати з іноземними.

Проведено соціологічне опитування споживачів та встановлено, що найбільш популярними брендами є ТМ Ariel, Persil, Gala, DeLaMark, TORTILLA та Grunwald. Визначено, що в побуті споживачі найчастіше стикаються із забрудненням бавовняних (фланель, ситець, бязь) та шовкових (атлас) тканин. Аналіз результатів опитування виявив найбільш поширені види плям: від губної помади, трави, крові, вина та дезодоранту.

Результати досліджень оцінки якості пральних порошків показали, що маркування, органолептичні та фізико-хімічні показники всіх досліджуваних зразків відповідають вимогам чинних нормативних документів. Пральний порошок ТМ Persil показав найвищу ефективність у видаленні поширених плям з різних тканин. Інші досліджувані бренди також показали високу ефективність: ТМ Ariel та Gala. Встановлено, що найменш ефективним є пральний порошок ТМ TORTILLA.

На основі аналізу матриці BCG та SWOT-аналізу, можна зробити висновок, що управління асортиментною політикою пральних порошків є складним, але важливим процесом, який вимагає постійного балансу між підтримкою існуючих лідерів ринку, інвестуванням в інновації та реагуванням на зовнішні зміни.

Пральні порошки, що належать до категорії «Дійні корови» (Ariel, Gala, Persil), є стабільним джерелом доходу. Важливо підтримувати їхню позицію шляхом незначних оновлень, не витрачаючи надмірних ресурсів. Інвестування в «Зірки» та «Знаки питання» – це основа майбутнього зростання. Як показали BCG-аналіз та SWOT, зростає попит на екологічні (DeLaMark, Grunwald) та інноваційні продукти (TORTILLA), що є «зірками» на ринку. Компаніям необхідно активно інвестувати в їхній розвиток та просування. «Знаки питання» (Alles GUT!, UIU, Clever) мають потенціал, але вимагають ретельного аналізу та інвестицій, щоб стати успішними. Пральні порошки, які не мають перспектив зростання і не приносять достатнього прибутку («Собаки» – Savex, Miele, Denkmit), повинні бути або виведені з асортименту, або їх підтримка має бути мінімізована. Це дозволить перенаправити ресурси на більш перспективні товари.

SWOT-аналіз виявив, що ринок знаходиться під впливом екологічних трендів та зміни споживчих уподобань. Виробники повинні адаптуватися до цих загроз, інвестуючи в товари екологічного спрямування та зручні формати, що дозволить їм перетворити ці виклики на можливості. Це допоможе подолати слабкі сторони, такі як проблеми з розчиненням порошків та нестандартизовану систему позначень.

Розроблено деталізовані інформативні емблеми для пральних порошків, що є ключовим елементом для спрощення вибору, підвищення довіри споживачів, а також оптимізації управління асортиментною політикою досліджуваного товару. Ці емблеми допомагають споживачам приймати обґрунтовані рішення, надаючи їм прозору інформацію про товар. Вони вказують на ефективність залежно від жорсткості води,

призначення для конкретних видів забруднень та тканин, а також інформують про вміст відбілювачів і фосфатів. Ця система маркування сприяє інформованості та довірі, перетворюючи складний вибір прального порошку на просте і зрозуміле рішення.

Комплексний підхід до управління асортиментною політикою СМЗ (пральних порошків) реалізовано через розроблений алгоритм. Він структурований за етапами, що охоплюють глибокий аналіз ринку, показників якості та маркування, оцінку споживчого вибору товару, а також використання інструментів стратегічного аналізу (матриця VCG, SWOT-аналіз). Крім того, для полегшення вибору споживачів була уніфікована система маркування на упаковках, яка містить емблеми для позначення жорсткості води, типу тканини, виду забруднень, відбілювача та вмісту фосфатів.

Загалом доведено, що ефективне управління асортиментною політикою пральних порошків – це комплексний та динамічний процес, що вимагає постійного аналізу ринку та інновацій для забезпечення стабільності та довгострокового зростання.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Волошина С., Козлова В. Стан і перспективи розвитку ринку синтетичних мийних засобів в Україні. *Економіка і суспільство. Економіка та управління підприємствами*. 2017. №10. С. 222-225.
2. Постанова Кабінету Міністрів України від 20 серпня 2008 р. № 717 «Про затвердження Технічного регламенту мийних засобів» (2008). URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/717-2008-%D0%BF#Text>
3. Коломієць Т.М., Черняк Л.В. Якість безфосфатних порошків для прання білизни. *Товари і ринки*. 2017. №1. С. 50-57.
4. Ільчук, О.С. Вплив синтетичних миючих засобів на здоров'я людини. 2015. URL: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/f406101a-2a9d-4295-9635-e078efbc3b77/content>
5. Чернявська А.Ю. Дослідження впливу хімічних сполук у складі синтетичних миючих засобів на довкілля методом біоіндикації. *Екологія (Екологія та охорона навколишнього середовища)*. 2023. URL: <https://er.chdtu.edu.ua/handle/ChSTU/4706>
6. Черевата Т.М. Асортимент та споживні властивості пральних порошків. *Наукові праці Одеської національної академії харчових технологій*. 2014. № 46(1). с. 291-295
7. A. Ferri (2016). Laundry Performance: Effect of Detergent and Additives on Consumer Satisfaction. *Tenside Surf. LAUNDRY/CLEANING AGENTS*. 2013. №53. P. 375-386.
8. Irshad N., Shaikh Mansoor Ahammed M. (2024). Effect of washing method and detergent type on laundry greywater characteristics. *Journal of Water Process Engineering*. 2024. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2214714424013357>
9. Abdal-Rhman Magdy Abdullah Youssef. Detergents Heavy-Duty Powder. 2019. URL: https://www.researchgate.net/publication/331732053_Detergents_HeavyDuty_Powder
10. Жалдак М., Полюга В., Мокроусова О. Поведінка споживачів у виборі пральних порошків. *Товари і ринки*. 2025. №53(1). с. 110-125.
11. Дороган-Писаренко Л., Єгорова О., Яснолоб І. Методологічні та прикладні аспекти використання матриці БКГ. *Інфраструктура ринку*. 2023. №72. с. 174-179.

DOI: 10.32782/infrastruct72-31

12. Копчак Ю. С., Лобунець Т. В., Луковський Р. І. SWOT-аналіз як важливий інструмент у розробці стратегії бізнесу. *Економіка та суспільство*. 2024. №61. DOI:10.32782/2524-0072/2024-61-146

13. ДСТУ 2972:2010. Засоби мийні синтетичні порошкоподібні. Загальні технічні вимоги та методи випробовування. [Чинний від 2010-12-27]. Вид. офіц. Київ. 2010. 11 с. Держспоживстандарт України.

14. Тернова А.С., Верінкін О.М. Оцінка економіко-екологічного бренду підприємства на ринку мийних засобів України. *Економіка та управління національним господарством*. 2021. №56. с. 54-61.

15. Державна митна служба України. Статистика та реєстри. Статистичний експорт та імпорт товарів. Goods_country. URL: <https://customs.gov.ua/statistika-ta-reiestri>

16. Економічна правда. Велике українське прання. 2024. URL: <https://www.epravda.com.ua/publications/2023/08/17/702882/>

17. Kit Chapman. The science behind the suds. 2 February 2024. URL: <https://edu.rsc.org/everyday-chemistry/how-does-washing-detergentwork/4018846.article>.

18. Chapotot E.e, Abi Akle A., Minel Stéph., Yannou B. Comparative study of theoretical and real uses of eco-designed laundry detergents. International conference on engineering design, ic. 15–18 august 2021, Technical university of denmark: Technical university of denmark. URL: [file:///C:/Users/%D0%92%D0%B8%D0%BA%D1%82%D0%BE%D1%80%D0%B8%D1%8F/Downloads/DS68_6-544%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/%D0%92%D0%B8%D0%BA%D1%82%D0%BE%D1%80%D0%B8%D1%8F/Downloads/DS68_6-544%20(1).pdf)

19. Звіт щодо перспектив ринку пральних порошоків 2023–2032 pp. 115 с. URL: <https://www.polarismarketresearch.com/industry-analysis/laundry-detergentmarket>

20. Лазаренко А. На ринку мийних засобів останній парад настає. Бізнес. URL: https://zn.ua/ukr/business/na_rinku_miynih_zasobiv_ostanniy_parad_nastae.html

21. Офіційний сайт ТОВ «Епіцентр К». URL: <https://epicentrk.ua/>

22. Офіційний сайт ТОВ «РУШ». URL: <https://eva.ua/ua/>

23. Офіційний сайт ТОВ «МАУДАУ». URL: https://maudau.com.ua/?gad_source=1&gad_campaignid=13622801975&gbraid=0AAAAABiTv2pupNlxR_dhEDMJmMDmFpKpj&gclid=Cj0KCQjw267GBhCSARIsAOjVJ4FL5oWHTGoy0pBVC6dnt2sf4WH5GmAGWF0Xj9FDhTRGCekjWTgBmJgaAjEJALw_wcB

24. Офіційний сайт ТОВ «Нова Лінія1». URL: <https://www.nl.ua/>

25. Офіційний сайт ТОВ «РОЗЕТКА.УА». URL: <https://rozetka.com.ua/>

26. Товарознавство. Т. 4. Господарські товари : підручник / Т. М. Коломієць, О. І. Сім'ячко, В. О. Комаха. Київ : Київ. нац. торг.-екон. ун-т, 2020. 364 с.

2.6 ЕЛЕКТРООКИСЛЕННЯ КАРБАМІДУ У ПРОЦЕСАХ ВОДНЕВОЇ ЕНЕРГЕТИКИ: ТЕРМОДИНАМІЧНА ОЦІНКА ТА ПРИНЦИПИ ЗЕЛЕНОЇ ХІМІЇ

Проценко В. С.

Український державний університет науки і технологій
v.s.protsenko@ust.edu.ua

Проведено порівняльний термодинамічний аналіз кількох реакційних схем електрохімічного виробництва водню, у яких анодною реакцією виступає окиснення карбаміду як більш екологічно приваблива альтернатива класичному виділенню кисню. Для кількісної оцінки ефективності електродних процесів застосовано комплекс метрик сучасної зеленої хімії: від традиційної і добре відомої атомної економії до нової метрики витрат електричної енергії («економія електроенергії»), що характеризує теоретично мінімальну електроенергію, потрібну для формування продуктів у стані рівноваги. Результати свідчать, що маршрути з окисненням карбаміду зазвичай потребують значно менших енергетичних витрат, ніж традиційний електроліз води зі сполученими реакціями виділення водню і кисню. Серед розглянутих варіантів найкращу енергоефективність показує реакційний шлях, який завершується утворенням газоподібного азоту і карбонат-іонів. На основі отриманих даних підкреслюється потреба в розробці нових електрокаталізаторів із вищою селективністю та зниженою перенапругою, що дозволить повною мірою використати енергетичні переваги окиснення карбаміду для «зеленого» виробництва водню.

Ключові слова: зелена воднева енергетика; електрохімічне окиснення карбаміду; метрики зеленої хімії

Концепція водневої енергетики, уперше запропонована Дж. Бокрісом [1], практична реалізація якої покликана запобігти катастрофічним кліматичним змінам унаслідок широкомасштабного спалюванні викопного палива шляхом переходу на використання водню як енергетичного носія [2, 3], значною мірою ґрунтується на використанні реакції електролізу води для синтезу зеленого водню [4–6]:



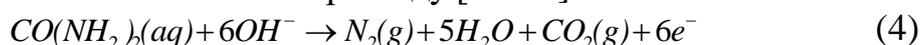
Сумарна реакція (1) є комбінацією катодного виділення водню і анодного виділення кисню, для яких відповідно рівняння реакцій для випадку лужного середовища мають наступний вигляд:



Як добре відомо, термодинамічна величина мінімальної напруги на електролізері при температурі 298 К дорівнює 1,23 В, що є немалою

величиною, а завдяки електродній поляризації та омичним складовим сумарна напруга на електролізері при електролізі води сягає ще більших значень [7]. У результаті це створює економічні проблеми через підвищення енерговитрат. Якщо омичні складові можуть бути принципово знижені за рахунок раціонального дизайну електролізера та оптимального підбору складу електроліту, а електродна поляризація знижена за рахунок розробки і використання ефективних електрокаталізаторів, то мінімальна напруга для електролізу води є природною (термодинамічною) межею, яка невідривно притаманна даній реакції і за даної температури з точки зору термодинаміки не може бути знижена в принципі.

Можливим шляхом розв'язання цієї проблеми є заміна реакції виділення кисню на інший анодний процес з більш сприятливою енергетикою [8, 9]. Однією з найбільш вдалих комбінацій є сполучення реакції виділення водню з реакцією електрохімічного окислення карбаміду [10–19]:



Або ж, якщо врахувати, що у сильно лужному середовищі кінцевим продуктом реакції буде не вуглекислий газ, а карбонат-іони, то більш точною формою запису рівняння реакції електрохімічного окислення карбаміду є наступний:

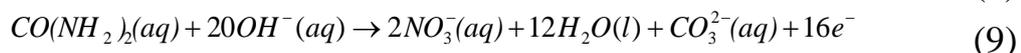
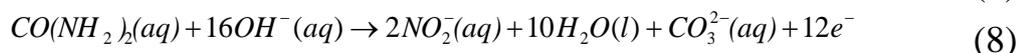
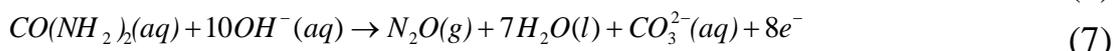
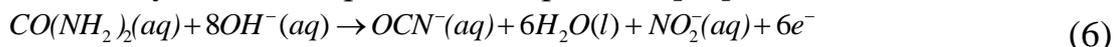


Справа у тому, що, як багаторазово вказувалося в літературі [10–12, 20–22] термодинамічна напруга на електролізері для сумарної реакції, що складається з катодного виділення водню та реакції електрохімічного окислення карбаміду при температурі 298 К становить 0,37 В, що помітно менше, ніж 1,23 В для випадку сполучення виділення водню і кисню у реакції (1).

Хоча кінетика і механізм реакції (4) є предметом численних і детальних досліджень [10–22], термодинамічні аспекти цього процесу вивчені суттєво слабше, а наявні дані з цього приводу дещо суперечливі. Зокрема, було встановлено, що термодинамічна напруга на електролізері для сумарної реакції за участю електрохімічного окислення карбаміду і виділення водню при 298 К, якщо не враховувати утворення карбонатів, становить не 0,37 В, а лише 0,072 В [23], а з врахуванням неминучого утворення карбонатів у лужному середовищі (реакція (5)), яке зазвичай використовується для електролізу води, сумарна реакція взагалі стає термодинамічно самодовільною зі значенням електрорушійної сили 0,024 В [24]. Такі результати, з одного боку, додатково свідчать про надзвичайну перспективність використання реакції електрохімічного окислення карбаміду для заміни процесу виділення кисню на аноді при синтезі зеленого водню, а, з іншого, вказують на недостатній рівень знань про термодинамічні аспекти електрохімічної реакції (4), що очевидно гальмує подальший прогрес у зачепленому науковому напрямку.

Більш того, у літературі зазначалося, що реакція (4) не є єдиною можливим варіантом анодної електрохімічної трансформації карбаміду на

аноді у лужному середовищі, і можливе протікання наступних альтернативних процесів окислення [25–27]. Зокрема, розглядається протікання наступних альтернативних процесів [28]:



Зазначимо, що тут не наводяться декілька гіпотетичних реакцій, в яких утворюються газоподібний CO_2 і HCO_3^- -іони, оскільки це малоймовірно для сильнолужних середовищ, зазвичай використовуваних при електролізі води.

У наявній літературі відсутній детальний термодинамічний аналіз цих конкуруючих реакцій, хоча такі дані є важливими з точки зору аналізу потенційної енергоефективності реакції електрохімічного окислення карбаміду для зеленої водневої енергетики.

Слід зазначити, що процеси електрохімічного окислення $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ має суттєве значення і актуальність не тільки для синтезу водню у відновлювальній енергетиці та для створення так званих паливних елементів прямого окиснення карбаміду («direct urea fuel cells») [29–32]. Оскільки карбамід (сечовина) у великій кількості виробляється у результаті метаболізму тварин і людей і так чи інакше потрапляє у стічні побутові і промислові води а також стічні води, що походять від агропромислових підприємств, то постає гостре питання очищення стічних вод від сечовини, яке, серед іншого може бути успішно реалізоване з використанням електрохімічних методів очищення, заснованих на реакції електрохімічного окислення карбаміду [33–35].

Оскільки згадані конкурентні процеси анодного окислення карбаміду є очевидним предметом розгляду в рамках концепції зеленої хімії [36–39], то становить значний інтерес їх оцінювання у світлі основних метрик зеленої хімії [40–43]. Зокрема, у даній роботі нами для різних шляхів протікання реакції анодної деструкції карбаміду розраховано і обговорено кількісні параметри, що характеризують атомну економію і характеристики енерговитрат (відповідно до другого і шостого принципів зеленої хімії [36]; у буквальному перекладі з англійської ці принципи можуть бути сформульовані наступним чином: «2. Методи синтезу повинні бути розроблені таким чином, щоб максимізувати включення всіх матеріалів, що використовуються в процесі, до кінцевого продукту... 6. Потреби в енергії повинні враховуватися з точки зору їхнього впливу на навколишнє середовище та економіку, і їх слід мінімізувати...»).

З огляду на зазначені вище актуальні проблеми, метою даного дослідження став аналіз паралельних процесів анодного окислення карбаміду з точки зору термодинамічних параметрів протікання конкурентних маршрутів цієї електрохімічної реакції та з позиції

відповідності критеріям атомної економії та енергоефективності в рамках принципів зеленої хімії.

Враховуючи зазначені актуальні проблеми, метою цього дослідження був комплексний аналіз процесів анодного окислення карбаміду з урахуванням термодинамічних параметрів різних конкурентних шляхів цієї електрохімічної реакції. Дослідження також спрямоване на оцінку відповідності цих процесів критеріям атомної економії та енергоефективності в контексті принципів зеленої хімії [44].

Методика проведення термодинамічних розрахунків

Розрахунки термодинамічних характеристик реакцій проводилися на підставі табличних величин стандартних ентальпій утворення та стандартних ентропій всіх молекул і іонів, що беруть участь в розглянутих реакціях (табл. 1).

Таблиця 1. Термодинамічні параметри речовин і іонів, що задіяні у реакціях, які розглядаються [45]

Речовина або іон	$\Delta H_{f, 298}^0$, кДж/моль	ΔS_{298}^0 , Дж/моль·К
CO(NH ₂) ₂ (кр)	-333,17	104,60
OH ⁻ (aq)	-230,02	-10,71
H ₂ (g)	0	130,52
N ₂ (g)	0	191,50
O ₂ (g)	0	205,04
H ₂ O (l)	-285,83	69,95
CO ₃ ²⁻ (aq)	-676,64	-56,04
NO ₂ ⁻ (aq)	-104,6	123,0
NO ₃ ⁻ (aq)	-207,4	146,4
OCN ⁻ (aq)	-146,0	106,7
N ₂ O (g)	81,6	220,0

Перерахунок стандартних ентальпії утворення і ентропії карбаміду з твердого стану на її розчинений стан проводили з урахуванням літературних даних [46] щодо даних про ентальпію і ентропію розчинення карбаміду у воді: $\Delta H = 16,91$ кДж/моль та $\Delta S = 62,59$ Дж/моль·К згідно з алгоритмом, описаним раніше [23, 24].

Всі розрахунки були проведені для температури 298 К. Стандартні ентальпії реакцій (ΔH_{298}^0) і зміни ентропії (ΔS_{298}^0) були знайдені як різниця між сумами молярних ентальпій і ентропій продуктів реакцій і вихідних речовин, відповідно. Стандартну зміну енергії Гіббса (ΔG_{298}^0) знаходили, користуючись рівнянням Гіббса-Гельмгольца:

$$\Delta G_{298}^0 = \Delta H_{298}^0 - 298\Delta S_{298}^0 \quad (10)$$

Термодинамічна величина напруги розімкнутого кола (open-circuit voltage, OCV) для електрохімічних реакцій були обчислені за допомогою формули:

$$OCV = \frac{\Delta G_{298}^0}{zF} \quad (11)$$

де z – кількість електронів, що задіяні у сумарній реакції, що розглядається; F – стала Фарадея (96485 Кл/моль).

Атомну економію (atom economy) обчислювали за рівнянням [47]:

$$Atom\ economy = \left(\frac{m.w.\ of\ the\ product}{m.w.\ of\ all\ reagents} \right) \times 100\%, \quad (12)$$

де чисельник включає молекулярну масу продукту, а знаменник містить сумарну молекулярну масу всіх вихідних реагентів.

Екологічний фактор (E factor) знаходили за рівнянням [41, 43]:

$$E\ -\ factor = \frac{m.w.\ of\ wastes}{m.w.\ of\ the\ product}, \quad (13)$$

де у чисельнику знаходиться молекулярна маса отримуваних відходів, а у знаменнику – молекулярна маса цільового бажаного продукту, утвореного відповідно до стехіометрії рівняння реакції.

Результати розрахунків та їх обговорення

Розраховані нами величини стандартних змін ентальпії, ентропії, енергії Гіббса, OCV та атомної економії для низки реакції систематизовані у табл. 2. У цій таблиці наведені дані для реакції електролізу води (реакція (I)), а також для збалансованих сумарних електрохімічних реакцій, складених з анодних півреакцій (4)–(9) та катодної півреакції (2), (реакції (II)–(VII)).

Таблиця 2. Обчислені термодинамічні характеристики та метрики зеленої хімії для реакцій, що розглядаються [44]

Номер реакції	Реакція	ΔH_{298}^0 , кДж/моль	ΔS_{298}^0 , Дж/моль·К	ΔG_{298}^0 , Дж/моль	OCV, В	Атомна економія, %	E фактор
I	$H_2O(l) \pm 2e^- \rightarrow H_2(g) + 0.5O_2(g)$	285,83	163,09	237229,18	1,229	11,1	0
II	$CO(NH_2)_2(aq) + H_2O(l) \pm 6e^- \rightarrow CO_2(g) + N_2(g) + 3H_2(g)$	208,58	559,58	41825,16	0,072	7,7	7,3
III	$CO(NH_2)_2(aq) + 2OH^-(aq) \pm 6e^- \rightarrow CO_3^{2-}(aq) + N_2(g) + 3H_2(g)$	99,66	381,25	-13952,50	0,024	6,4	10,0
IV	$CO(NH_2)_2(aq) + 2OH^-(aq) \pm 6e^- \rightarrow OCN^-(aq) + NO_2^-(aq) + 3H_2(g)$	525,70	475,49	384003,98	0,663	6,4	7,0
V	$CO(NH_2)_2(aq) + 2OH^-(aq) + H_2O(l) \pm 8e^- \rightarrow N_2O(g) + CO_3^{2-}(aq) + 4H_2(g)$	467,09	470,32	326934,64	0,424	7,1	13,0
VI	$CO(NH_2)_2(aq) + 4OH^-(aq) + 2H_2O(l) \pm 12e^- \rightarrow 2NO_2^-(aq) + CO_3^{2-}(aq) + 6H_2(g)$	922,16	708,83	710928,66	0,614	7,3	12,7
VII	$CO(NH_2)_2(aq) + 4OH^-(aq) + 4H_2O(l) \pm 16e^- \rightarrow 2NO_3^-(aq) + CO_3^{2-}(aq) + 8H_2(g)$	1288,22	876,77	1026942,54	0,665	8,0	11,5

Видно, що всі ці електрохімічні процеси є ендотермічними, що напевне, значною мірою визначається тим, що в них залучені вихідні речовини з вельми негативними значеннями теплот утворення: насамперед йдеться про рідку воду, розчинений карбамід, також вельми негативне

значення ентальпії утворення притаманне гідроксид-іону. Отже, витрачання цих реагентів з достатньо високою енергією хімічних зв'язків потребує поглинання теплоти, що і визначає загальну ендотермічність процесів. Особливо висока кількість теплоти поглинається у реакції (VI) з утворенням нітрат-іонів як одного з кінцевих продуктів реакції. Якщо порівняти величини теплового ефекту реакцій (II)–(VII) з величиною, характерною для електролітичного розкладання води (I), то для реакцій з утворенням газоподібного азоту теплота процесу є меншою, ніж у реакції (I), а для реакцій, що передбачають утворення інших продуктів окислення азоту, навпаки, суттєво більшою.

Втім, визначені кількості теплоти, як це зазвичай буває у термохімічних розрахунках, залежать від запису стехіометричного рівняння реакції, тобто, по суті, ці теплоти віднесені до різних кількостей синтезованого водню, який є цільовим продуктом у всіх цих процесах. Якщо далі перерахувати термодинамічні параметри, зокрема, ізобарний тепловий ефект реакції у розрахунку на 1 моль H_2 , то картина виходить дещо іншою (табл. 3). При такому порівнянні кількість теплоти, що поглинається у всіх реакціях за участю карбаміду, є суттєво нижчою, ніж при електролізі води. Найменша кількість теплоти поглинається в реакції, що передбачає утворення як кінцевих продуктів реакції деструкції карбаміду газоподібного азоту і карбонат-іонів (реакція (III)).

Таблиця 3. Обчислені зміни стандартних ентальпії, ентропії та енергії Гіббса у розрахунку на 1 моль виробленого водню [44]

Номер реакції	Реакція	ΔH^0_{298} , кДж	ΔS^0_{298} , Дж/К	ΔG^0_{298} , Дж
I	$H_2O(l) \pm 2e^- \rightarrow H_2(g) + 0.5O_2(g)$	285,83	163,09	237229,18
II	$CO(NH_2)_2(aq) + H_2O(l) \pm 6e^- \rightarrow CO_2(g) + N_2(g) + 3H_2(g)$	69,53	186,53	13941,72
III	$CO(NH_2)_2(aq) + 2OH^-(aq) \pm 6e^- \rightarrow CO_3^{2-}(aq) + N_2(g) + 3H_2(g)$	33,22	127,08	-4650,83
IV	$CO(NH_2)_2(aq) + 2OH^-(aq) \pm 6e^- \rightarrow OCN^-(aq) + NO_2^-(aq) + 3H_2(g)$	175,23	158,50	128001,33
V	$CO(NH_2)_2(aq) + 2OH^-(aq) + H_2O(l) \pm 8e^- \rightarrow N_2O(g) + CO_3^{2-}(aq) + 4H_2(g)$	116,77	117,58	81733,66
VI	$CO(NH_2)_2(aq) + 4OH^-(aq) + 2H_2O(l) \pm 12e^- \rightarrow 2NO_3^-(aq) + CO_3^{2-}(aq) + 6H_2(g)$	153,69	118,14	118488,11
VII	$CO(NH_2)_2(aq) + 4OH^-(aq) + 4H_2O(l) \pm 16e^- \rightarrow 2NO_3^-(aq) + CO_3^{2-}(aq) + 8H_2(g)$	161,03	109,60	128367,82

Всі розглянуті електрохімічні перетворення (I)–(VII) без винятку супроводжуються зростанням ентропії (табл. 2). Такий результат обумовлений утворенням у ході цих реакцій великої кількості газів (водню, азоту, оксиду азоту, вуглекислого газу), які, як відомо, мають великі молярні ентропії у порівнянні з рідинами і твердими речовинами. Зростання ентропії з точки зору термодинамічного підходу означає підвищення ступеня хаосу і ступеня деградації енергії. З фундаментальних екологічних міркувань збільшення ентропії в антропосфері нашої планети є небажаним ефектом. Дійсно, мінімальне виробництво ентропії має

розглядатися як один з критеріїв сталого розвитку (у контексті «sustainability») [48]. Втім, слід зважати, що водень, генерований у реакціях, що розглядаються, передбачається надалі використовувати як екологічно безпечне паливо, наприклад, шляхом його окислення у паливних елементах за реакцією, зворотною реакції (I), яка, очевидно, супроводжується відповідним зменшенням ентропії. Таким чином, загальна ентропія Землі як термодинамічної системи, сильно зростати не буде. Лише термодинамічно необоротні процеси, такі як виділення теплоти за рахунок омичних втрат в електролізерах і паливних елементах та за рахунок поляризації будуть призводити до незворотного зростання ентропії планети. Втім, ці процеси не є предметом детального розгляду даного дослідження. Цікаво, що перерахунок зміни ентропії, генерованої на один моль водню у різних реакціях, показує (табл. 3), що різниці між цими величинами для реакцій (I)–(VII) значною мірою елімінуються. Це означає, що головним чинником, який у першому наближенні визначає зростання ентропії в цих процесах, є саме утворення газоподібного водню.

Стандартні зміни енергії Гіббса у ході розглянутих реакцій є величинами позитивними, що визначається позитивними ентальпійними чинниками, які превалюють над також позитивними ентропійними чинниками. З точки зору термодинаміки, додатні значення ΔG^0_{298} означають неспонтанність цих процесів і вимагають для їх проведення підведення енергії ззовні (що цілком природно для неспонтанних реакцій при електролізі). Єдиним виключенням з цього є реакція (III) з утворенням азоту та карбонат-іонів як продуктів деструкції карбаміду, для якої $\Delta G^0_{298} < 0$ [24]. Напевне, це впливає з вельми невисокого значення стандартної зміни ентальпії для цієї реакції, яке не може компенсувати додатну величину ентропійного чинника в рівнянні Гіббса-Гельмгольца. Отже, такий процес мав би відбуватися спонтанно, наприклад, в гальванічному елементі, на що вказує умовний знак «мінус» для ОСV даної реакції (табл. 2). Однак, як відомо, фактично цей процес спонтанно не відбувається, а реалізується неспонтанно при електролізі, ба більше вимагає відносно високої напруги розкладання, хоча і меншої, ніж для електролітичного розкладання води (I) [10–12]. Причиною цього є вельми повільна кінетика процесу [24].

Зазначимо, що на підставі обчислених величин ОСV і з урахуванням стандартного потенціалу півреакції (2) (–0,828 В у шкалі стандартного водневого електроду) були обчислені стандартні потенціали півреакцій (6)–(9) (табл. 4). Отримані значення практично збігаються у межах допустимої похибки обчислень із величинами, наведеними у публікації [28], окрім півреакції (6), для якої нами отримано значення –0,165 В, а у згаданій роботі наведено значення –0,43 В. Причини такого сильного незбігу для півреакції (6) наразі незрозумілі.

Величини ОСV, що були знайдені з обчислених ΔG^0_{298} , для будь-який з розглянутих напрямків протікання реакції електрохімічного синтезу водню із спряженою півреакцією окислення карбаміду (II)–(VII) є меншими, ніж 1,299 В, яке притаманне для розщеплення води, що і

визначає надзвичайну перспективність такого підходу для зеленої водневої енергетики.

Втім не всі ці процеси за участю карбаміду є однаково екологічно привабливими, оскільки супроводжуються утворенням низки відходів різної кількості і різної степені небезпеки для довкілля. Для кількісної оцінки такої небезпеки ми скористалися відомими у теорії і практиці зеленої хімії метриками: атомною економією і екологічним фактором (E фактором) (табл. 2).

Таблиця 4. Порівняння обчислених стандартних потенціалів напівреакцій (5)–(9) з відповідними значеннями, наведеними у літературі [44]

Півреакція із номером у тексті	E^0 , В дане дослідження	E^0 , V [28]
$CO(NH_2)_2(aq) + 8OH^- \rightarrow N_2(g) + 6H_2O + CO_3^{2-}(aq) + 6e^-$ (5)	-0,852	-0,85
$CO(NH_2)_2(aq) + 8OH^-(aq) \rightarrow OCN^-(aq) + 6H_2O(l) + NO_2^-(aq) + 6e^-$ (6)	-0,165	-0,43
$CO(NH_2)_2(aq) + 10OH^-(aq) \rightarrow N_2O(g) + 7H_2O(l) + CO_3^{2-}(aq) + 8e^-$ (7)	-0,404	-0,40
$CO(NH_2)_2(aq) + 16OH^-(aq) \rightarrow 2NO_2^-(aq) + 10H_2O(l) + CO_3^{2-}(aq) + 12e^-$ (8)	-0,214	-0,22
$CO(NH_2)_2(aq) + 20OH^-(aq) \rightarrow 2NO_3^-(aq) + 12H_2O(l) + CO_3^{2-}(aq) + 16e^-$ (9)	-0,163	-0,16

Атомна економія по суті є величиною, що характеризує ступінь включення всіх матеріалів, які використовуються в процесі, у кінцевий продукт. Для ідеально чистих з точки зору хімії сталого розвитку процесів ця величина становить 100%. Чим меншою є атомна економія, тим більша відносна кількість вихідних речовини перетворюється не у кінцевий продукт, а у відходи, які потрібно утилізувати чи перероблювати. Видно, що всі з розглянутих реакцій, включно з конвенційною реакцією електролізу води (I), демонструють відносно невисокі показники атомної економії на рівні 6–11%. Такі відносно низькі значення метрики у даному випадку є наслідком специфічної і унікальної малої молекулярної маси водню, який тут розглядається як кінцевий продукт. Отже, такі невисокі значення зовсім не означають низьку екологічну привабливість процесів електролітичного синтезу водню. Тут слід брати до уваги екологічну небезпеку супутніх продуктів, що утворюються разом із воднем. Тому більш коректним в даному випадку буде використання запропонованого Шелдоном [39, 41] E-фактора, що оцінює кількість небезпечних відходів у розрахунку на одиницю маси речовини, що є кінцевим продуктом хімічного синтезу.

Розраховані нами значення E-фактора з урахуванням теоретичної стехіометрії наведені у табл. 2. В цих розрахунках враховувалося, що деякі з продуктів, утворюваних в реакціях, що розглядаються, є безпечними для довкілля (газоподібні азот і кисень, навіть, якщо вони будуть прямо скидатися в атмосферу), тому при обчисленні E-фактора вони відкидалися, так само, як завжди в таких розрахунках відкидається вода. Карбонат-іони (наприклад, у формі солей лужних металів), хоча і не є вельми шкідливим і

токсичними, однак будуть потребувати стадії періодичного видалення з розчинів, що використовуються при електролізі (наприклад, шляхом хімічного оброблення [49]), що невідворотно приводитиме до утворення нових відходів, які потребуватимуть рекуперації. Тому карбонат-іони враховувалися у розрахунках як відходи. Нарешті, оксид азоту N_2O , а також ціанат-, нітрат- та нітрит-іони є безсумнівними шкідливими для довкілля забруднювачами [50–53], які також враховувалися у наших розрахунках як відходи.

Чим меншим є величина E-фактора, тим більш екологічно безпечним є процес. З результатів проведених розрахунків видно, що найбільш екологічно чистим є процес розкладання води (I), оскільки він, очевидно, взагалі не супроводжується викидом шкідливих речовин. Втім, слід зважувати, що отримані нами величини є теоретичними і не враховують утворення викидів у допоміжних процесах і технологіях. Зокрема, слід враховувати, що у процесах лужного електролізу води використовуються достатньо концентровані розчини луги, які час від часу слід очищувати та регенерувати, що буде супроводжуватися утворенням певної кількості відходів, що очевидно, не враховувалося у проведених розрахунках. Більш чистим варіантом проведення реакції (I) є її реалізація в електролізерах з протоннообмінною мембраною (ПЕМ), де використовується чиста вода, а не концентрований лужний розчин, як вихідний реагент [54]. Втім і у цих процесах у повному життєвому циклі електролізерів і іонообмінних мембран, що тут використовуються, буде виникати певна кількість відходів.

Найвищі значення E-фактора отримані для процесів, що приводять до утворення токсичних сполук азоту, що походить з молекул карбаміду: оксиду N_2O та нітрит- і нітрат-іони. Це небажані шляхи реалізації процесу і їх слід уникати шляхом створення високоселективних електрокаталізаторів, які проводитимуть процес за іншими альтернативними маршрутами.

Одна з найменших величин E-фактора притаманна для реакції (II) (табл. 2), продуктами перетворення карбаміду у якій є вуглекислий газ та молекулярний азот. Втім відносна екологічна безпечність цього маршруту є дещо уявною, оскільки емісія парникового газу CO_2 прямо суперечить концепції створення безвуглецевої відновлювальної енергетики. Однак, на нашу думку, практична реалізація такого маршруту реакції є малоімовірною, оскільки вуглекислий газ має швидко поглинатися у концентрованому лужному розчині для електролізу, і практично буде проходити процес (III), який передбачає формування карбонат-іонів як кінцевих продуктів реакції, що очевидно змінює термодинамічні параметри реакції, які є функціями стану [24].

Отже, аналіз атомної ефективності та значень E-фактора свідчить, що найбільш ефективною альтернативою для реакції виділення кисню при електролітичному розщепленні води є саме реакція (III). Такий же висновок впливає і при застосуванні принципу енергоефективності, що

також відіграє важливу роль при аналізі альтернативних варіантів з точки зору принципів зеленої хімії. Справді, як показано вище, реакція (III), що супроводжується утворенням карбонат-іонів і молекулярного азоту, є єдиною, яка є термодинамічно спонтанною і мала б протікати не з витратою зовнішньої електричної енергії, як всі інші реакції, а навпаки, з її генеруванням, тобто за принципом дії гальванічного елемента.

У цьому контексті слід зупинитися на тій обставині, що для аналізу енергоефективності електрохімічної реакції в рамках підходу зеленої хімії порівняння величин стандартних потенціалів електрохімічних реакцій не є бездоганим. Справа у тому, що у реакціях, що розглядаються, бере участь різна кількість електронів, що прямо впливає на енерговитрати і також має бути врахованим при аналізі. Однак, величина стандартного потенціалу не враховує цю особливість і нічого не каже про ці відмінності. Тому більш коректною метрикою енергоефективності має бути зміна стандартної енергії Гіббса у ході реакції, перерахована на одиницю кількості речовини (чи маси) кінцевого продукту [45]:

$$\text{Electricity economy} = \frac{zF \cdot OCV}{n} = \frac{\Delta G}{n} \quad (14)$$

де z – число електронів у записі сумарного рівняння електрохімічної реакції; F – стала Фарадея; OCV – це термодинамічна величина напруги розімкненого кола; n – це стехіометричний коефіцієнт перед кінцевим продуктом в записі рівняння реакції, що розглядається.

Ця величина є аналогом метрики атомної економії і може бути умовно названа економією електроенергії (electricity economy). За своїм смыслом для термодинамічно неспонтанних електрохімічних реакцій ($\Delta G > 0$) ця величина показує мінімально необхідну кількість зовнішньої електричної енергії, необхідної для рівноважного утворення 1 моль кінцевого продукту реакції. Чи меншою є величина електроенергії економії, тим меншою є мінімально можливі енергетичні витрати для протікання цільової електрохімічної реакції і, відповідно, тим кращим є процес в контексті розвитку зеленої хімії.

Зрозуміло, що електроенергії економія є суто теоретичною величиною, яка дозволяє лише оцінити нижню межу потенційних енерговитрат. У реальних електрохімічних процесах витрати електроенергії будуть вищими за рахунок поляризації електродів та втрат через омичні складові. До того ж, сумарні витрати електричної енергії можуть зростати за рахунок зниження виходу за струмом цільової реакції. Однак, теоретично поляризацію електродних реакцій можна зменшувати через підбір високоефективних електрокаталізаторів, а омичні складові знижувати через раціональний дизайн обладнання та варіювання складом і концентрацією електролітів. А от суто термодинамічна величина електроенергії економії є незмінним атрибутом кожної конкретної електрохімічної реакції за даних умов, тому може розглядатися як ще одна базова метрика для аналізу в зеленій хімії.

Цікаво, що для термодинамічно спонтанних електрохімічних процесів ($\Delta G < 0$) величина електроенергії економії набуває умовного знаку «мінус» і відповідає добре відомій величині у галузі хімічних джерел струму – щільність енергії («energy density of a power source»). Чим вищою є ця величина за абсолютним значенням, тим кращими за цим показником є джерело струму (батарея чи акумулятор).

Порівняння розрахованих величин економії електроенергії для реакцій електросинтезу водню (I)–(VII) (останній стовпчик у табл. 3) показує, що у всіх альтернативних маршрутах реакції за участю карбаміду (реакції (II)–(VII)) економія електроенергії є нижчою, ніж для конвенційного електролізу води (реакція (I)). Найвигіднішою, очевидно, є реакція (III) (термодинамічно спонтанний процес), на другому місці після неї йде реакція (II) з утворенням газоподібних азоту і вуглекислого газу. Реакції, що передбачають формування оксидів азоту та нітрит-, нітрат- і ціанат-іони є менш привабливими з позиції енергоефективності.

З отриманих даних випливає що вибір найбільш екологічно чистої альтернативи серед семи розглянутих шляхів реакції повинен базуватися на аналізі саме показника економії електроенергії. Дійсно, всі реакції демонструють дуже схожі значення атомної економії, тоді як їхні показники економії електроенергії суттєво відрізняються, що робить їх вирішальним фактором для оцінки потенційної екологічної привабливості.

Висновки. Здійснено порівняння різних шляхів для електрохімічного синтезу водню з анодним окисненням карбаміду, який розглядається як потенційна альтернатива традиційному процесу окиснення води, що включає реакцію виділення кисню на аноді. У рамках проведеного аналізу враховувалися як термодинамічні аспекти реакцій, так і метрики зеленої хімії, такі як атомна економія, E-фактор та енергоефективність. Це дозволило комплексно оцінити переваги і недоліки кожного процесу з точки зору їх екологічної безпеки, енергетичних витрат та можливостей для інтеграції в стійкі енергетичні системи. Використання карбаміду як донорної речовини для електрохімічної генерації водню є не лише цікавим з точки зору хімії, але й відкриває нові можливості для розвитку екологічно чистих та енергоефективних технологій.

Порівняння реакцій, що включають окиснення карбаміду замість традиційного окиснення кисню, показало значні їх переваги в контексті зеленої хімії. Це дозволяє не лише знизити енергетичні витрати на процеси водневого синтезу, але й зменшити утворення шкідливих відходів. У реакціях з карбамідом відбувається утворення менш токсичних і більш легко утилізованих побічних продуктів, таких як газоподібний азот і карбонат-іони, що робить процес більш екологічним. Крім того, можливість використання карбаміду, як сировини, доступної в значних кількостях, та її більш невисока ціна відкривають перспективи для впровадження цього методу в масштабні промислові процеси. Цей підхід значно сприяє розвитку сталих технологій водневої енергетики, що є важливою складовою частиною «зеленої» енергетичної революції.

Одним із важливих результатів дослідження є запропонована нова метрика для оцінки енергоефективності електрохімічних процесів – економія електроенергії. Ця метрика дозволяє врахувати мінімальні теоретичні енергетичні витрати, необхідні для здійснення електрохімічної реакції при створенні конкретного кінцевого продукту, такого як водень. Розрахунки показали, що процеси, пов'язані з використанням карбаміду, демонструють суттєво кращі показники в порівнянні з традиційним електролізом води, зокрема, через здатність до зниження енергетичних витрат за рахунок термодинамічної спонтанності деяких з цих реакцій. Оцінка реакцій за допомогою метрики економії електроенергії дозволяє точніше розкрити потенціал для зменшення витрат енергії і покращення загальної енергоефективності, що є критично важливим для подальшого розвитку відновлювальної енергетики.

З проведеного аналізу випливає, що найбільш ефективною з позиції концепції зеленої хімії є реакція окислення карбаміду, що приводить до формування карбонат-іонів і газоподібного азоту. Втім, як випливає з літературних даних, по перше, не завжди процес є селективним і можуть утворюватися інші продукти окислення азоту, більш шкідливі для довкілля. А по-друге, електродний потенціал, при якому відбувається окислення карбаміду на аноді, як правило, визначається не термодинамічними характеристиками самої реакції, а термодинамікою електрохімічної пари Ni(III)/Ni(II), що є найвідомішим електрокаталізатором. І ці потенціали, хоча і менші, ніж для виділення кисню, але все ж достатньо високі. Звідси випливає важливе завдання на майбутнє: розробка нових електрокаталізаторів для реакції окислення карбаміду, можливо і скоріше, не на основі оксидів-гідроксидів нікелю, а інших електрокаталітичних матеріалів, які б були високо селективними і високоефективними, щоб повною мірою реалізувати значний термодинамічний потенціал, закладений у реакцію окислення карбаміду. Це дозволить створити сучасні, економічні і екологічно безпечні процеси електрохімічної генерації водню для відновлювальної енергетики.

Дана робота підготовлена на основі попередньої публікації [44].

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Bockris J. O' M. The origin of ideas on a Hydrogen Economy and its solution to the decay of the environment. *Int. J. Hydrogen Energy*. 2002. Vol. 27. P. 731–740.
2. Bogdanov D., Ram M., Aghahosseini A., Gulagi A., Oyewo A. S., Child M., Caldera U., Sadvoskaia K., Farfan J., De Souza Noel Simas Barbosa L., Fasihi M., Khalili S., Traber T., Breyer C. Low-cost renewable electricity as the key driver of the global energy transition towards sustainability. *Energy*. 2021. Vol. 227. Art. No. 120467.
3. Squadrito G., Maggio G., Nicita A. The green hydrogen revolution. *Renewable Energy*. 2023. Vol. 216. Art. No. 119041.
4. Shih A.J., Monteiro M.C.O., Dattila F., Pavesi D., Philips M., da Silva A.H.M., Vos R.E., Ojha K., Park S., van der Heijden O., Marcandalli G., Goyal A., Villalba M., Chen X., Gunasooriya G.T.K.K., McCrum I., Mom R., López N., Koper M.T.M. Water electrolysis. *Nat. Rev. Methods Primers*. 2022. Vol. 2. Art. No. 84.

5. Dawood F., Anda M., Shafiullah G.M. Hydrogen production for energy: An overview. *Int. J. Hydrogen Energy*. 2020. Vol. 45. P. 3847–3869.
6. Ajanovic A., Sayer M., Haas R. The economics and the environmental benignity of different colors of hydrogen. *Int. J. Hydrogen Energy*. 2022. Vol. 47. Art. No. 24136.
7. Xiang C., Papadantonakis K.M., Lewis N.S. Principles and implementations of electrolysis systems for water splitting. *Mater. Horiz.* 2016. Vol. 3. P. 169–173.
8. Wang C., Wu Y., Bodach A., Krebs M.L., Schuhmann W., Schüth F. A novel electrode for value-generating anode reactions in water electrolyzers at industrial current densities. *Angew. Chem. Int. Ed.* 2023. Art. No. e202215804.
9. Zhou W., Chen S., Meng X., Li J., Gao J. Energy-saving cathodic H₂ production enabled by non-oxygen evolution anodic reactions: A critical review on fundamental principles and applications. *Int. J. Hydrogen Energy*. 2023. Vol. 48. P. 15748–15770.
10. Paygozar S., Aghdam A.S.R., Hassanizadeh E., Andaveh R., Darband G.B. Recent progress in non-noble metal-based electrocatalysts for urea-assisted electrochemical hydrogen production. *Int. J. Hydrogen Energy*. 2023. Vol. 48. P. 7219–7259.
11. Anuratha K.S., Rinawati M., Wu T.-H., Yeh M.-H., Lin J.-Y. Recent development of nickel-based electrocatalysts for urea electrolysis in alkaline solution. *Nanomaterials*. 2022. Vol. 12. Art. No. 2970.
12. Boggs B.K., King R.L., Botte G.G. Urea electrolysis: direct hydrogen production from urine. *Chem. Commun.* 2009. P. 4859–4861.
13. Vedharathinam V., Botte G.G. Understanding the electro-catalytic oxidation mechanism of urea on nickel electrodes in alkaline medium. *Electrochim. Acta*. 2012. Vol. 81. P. 292–300.
14. Wang D., Yan W., Vijapur S.H., Botte G.G. Enhanced electrocatalytic oxidation of urea based on nickel hydroxide nanoribbons. *J. Power Sources*. 2012. Vol. 217. P. 498–502.
15. Li J., Zhang J., Yang J.-H. Research progress and applications of nickel-based catalysts for electrooxidation of urea. *Int. J. Hydrogen Energy*. 2022. Vol. 47. P. 7693–7712.
16. Lu S., Zheng X., Fang L., Yin F., Liu H. Rational engineering design of nickel hydroxides for urea oxidation reaction: A mini-review. *Electrochem. Commun.* 2023. Vol. 157. Art. No. 107599.
17. Ge J., Liu Z., Guan M., Kuang J., Xiao Y., Yang Y., Tsang C.H., Lu X., Yang C. Investigation of the electrocatalytic mechanisms of urea oxidation reaction on the surface of transition metal oxides. *J. Colloid. Interface Sci.* 2022. Vol. 620. P. 442–453.
18. Yan X., Zhang W.-D., Hu Q.-T., Liu J., Li T., Liu Y., Gu Z.-G. Defects-rich nickel nanoparticles grown on nickel foam as integrated electrodes for electrocatalytic oxidation of urea. *Int. J. Hydrogen Energy*. 2019. Vol. 44. P. 27664–27670.
19. Ma Y., Ma C., Wang Y., Wang K. Advanced nickel-based catalysts for urea oxidation reaction: Challenges and developments. *Catalysts*. 2022. Vol. 12. Art. No. 337.
20. Liu W., Qin Z., Dai X., Meng S., Niu X., Shi W., Wu F., Cao X. Coupling of NiFe layered double hydroxides with sulfides for highly efficient urea electrolysis and hydrogen evolution. *Energies*. 2023. Vol. 16. Art. No. 1092.
21. Miller A.T., Hassler B.L., Botte G.G. Rhodium electrodeposition on nickel electrodes used for urea electrolysis. *J. Appl. Electrochem.* 2012. Vol. 42. P. 925–934.
22. Yan W., Wang D., Botte G.G. Nickel and cobalt bimetallic hydroxide catalysts for urea electro-oxidation. *Electrochim. Acta*. 2012. Vol. 61. P. 25–30.
23. Protsenko V.S. Thermodynamic aspects of urea oxidation reaction in the context of hydrogen production by electrolysis. *Int. J. Hydrogen Energy*. 2023. Vol. 48. P. 24207–24211.
24. Protsenko V.S., Bobrova L.S., Butyrina T.E., Sukhatskyi O.D. Thermodynamics of electrochemical urea oxidation reaction coupled with cathodic hydrogen evolution reaction in an alkaline solution: Effect of carbonate formation. *Int. J. Hydrogen Energy*. 2024. Vol. 59. P. 354–358.

25. Li J., Li J., Liu T., Chen L., Li Y., Wang H., Chen X., Gong M., Liu Z.-P., Yang X., Deciphering and suppressing over-oxidized nitrogen in nickel-catalyzed urea electrolysis. *Angew. Chem. Int. Ed.* 2021. Vol. 60. Art. No. 26656.
26. Tatarchuk S.W., Medvedev J.J., Li F., Tobolovskaya Y., Klinkova A. Nickel-catalyzed urea electrolysis: from nitrite and cyanate as major products to nitrogen evolution. *Angew. Chem. Int. Ed.* 2022. Vol. 61. Art. No. e202209839.
27. Hopsort G., Pereira Do Carmo D., Latapie L., Loubière K., Serrano K.G., Tzedakis T. Progress toward a better understanding of the urea oxidation by electromediation of Ni(III)/Ni(II) system in alkaline media. *Electrochim. Acta.* 2023. Vol. 442. Art. No. 141898.
28. Akkari S., Sánchez-Sánchez C.M., Hopsort G., Serrano K.G., Loubière K., Tzedakis T., Benyahia R., Rebiai L., Bastide S., Cachet-Vivier C., Vivier V., Lopez-Viveros M., Azimi S., Progress on electrochemical and photoelectrochemical urea and ammonia conversion from urine for sustainable wastewater treatment. *Appl. Catal. B Environ. Energy.* 2025. Vol. 362. Art. No. 124718.
29. Gnana kumar G., Farithkhan A., Manthiram A. Direct urea fuel cells: recent progress and critical challenges of urea oxidation electrocatalysis. *Adv. Energy Sustainability Res.* 2020. Vol. 1. Art. No. 2000015.
30. Sayed E.T., Eisa T., Mohamed H.O., Abdelkareem M.A., Allagui A., Alawadhi H., Chae K.-J. Direct urea fuel cells: Challenges and opportunities. *J. Power Sources.* 2019. Vol. 417. P. 159–175.
31. Ye K., Wang G., Cao D., Wang G. Recent advances in the electro-oxidation of urea for direct urea fuel cell and urea electrolysis. *Top. Curr. Chem.* 2018. Vol. 376. Art. No. 42.
32. Fan L., Tu Z., Chan S.H. Recent development of hydrogen and fuel cell technologies: A review. *Energy Rep.* 2021. Vol. 7. P. 8421–8446.
33. Simka W., Piotrowski J., Robak A., Nawrat G. Electrochemical treatment of aqueous solutions containing urea. *J. Appl. Electrochem.* 2009. Vol. 39. P. 1137–1143.
34. Urbańczyk E., Sowa M., Simka W. Urea removal from aqueous solutions – a review. *J. Appl. Electrochem.* 2016. Vol. 46. P. 1011–1029.
35. Weerakoon D., Bansal B., Padhye L.P., Rachmani A., Wright L.J., Roberts G.S., Baroutian S. A critical review on current urea removal technologies from water: An approach for pollution prevention and resource recovery. *Sep. Purif. Technol.* 2023. Vol. 314. Art. No. 123652.
36. Anastas P.T., Warner J.C. *Green Chemistry: Theory and Practice.* Oxford University Press, 1998.
37. Anastas P.T., Kirchhoff M.M. Origins, current status, and future challenges of green chemistry. *Acc. Chem. Res.* 2002. Vol. 35. P. 686–694.
38. Lancaster M. *Green Chemistry: An Introductory Text.* The Royal Society of Chemistry, 2016.
39. Sheldon R.A. Fundamentals of green chemistry: efficiency in reaction design. *Chem. Soc. Rev.* 2012. Vol. 41. P. 1437–1451.
40. Constable D.J.C., Curzons A.D., Freitas dos Santos L.M., Geen G.R., Hannah R.E., Hayler J.D., Kitteringham J., McGuire M.A., Richardson J.E., Smith P., Webb R.L., Yu M. Green chemistry measures for process research and development. *Green Chem.* 2001. Vol. 3. P. 7–9.
41. Sheldon R.A., Bode M.L., Akakios S.G. Metrics of green chemistry: Waste minimization. *Curr. Opin. Green Sustainable Chem.* 2022. Vol. 33. Art. No. 100569.
42. Trost B.M. The atom economy – a search for synthetic efficiency. *Science.* 1991. Vol. 254. P. 1471–1477.
43. Martínez J., Cortés J.F., Miranda R. Green chemistry metrics, a review. *Processes.* 2022. Vol. 10. Art. No. 1274.

44. Protsenko V. Towards sustainable urea electro-oxidation: a thermodynamic and green chemistry evaluation of alternative pathways. *R. Soc. Open Sci.* 2025. Vol. 12. Art. No. 250156.
45. Lide D. R. *CRC Handbook of Chemistry and Physics*, 84th Edition, 2003–2004.
46. House K.A., House J.E. Thermodynamics of dissolution of urea in water, alcohols, and their mixtures. *J. Mol. Liq.* 2017. Vol. 242. P. 428–432.
47. Constable D.J.C., Curzons A.D., Cunningham V.L. Metrics to ‘green’ chemistry – which are the best? *Green Chem.* 2002. Vol. 4. P. 521–527.
48. Addiscott T.M. Entropy and sustainability. *Eur. J. Soil Sci.* 1995. Vol. 46. P. 161–168.
49. Sipos P., May P.M., Hefter G.T. Carbonate removal from concentrated hydroxide solutions. *Analyst.* 2000. Vol. 125. P. 955–958.
50. Yagiela J.A. Health hazards and nitrous oxide: a time for reappraisal. *Anesth. Prog.* 1991. Vol. 38. P. 1–11.
51. Dong K., Xie F., Chang Y., Chen C., Wang W., Lu D., Gu X. A novel strategy for the efficient decomposition of toxic sodium cyanate by hematite. *Chemosphere.* 2020. Vol. 256. Art. No. 127047.
52. Singh S., Anil A.G., Kumar V., Kapoor D., Subramanian S., Singh J., Ramamurthy P.C. Nitrates in the environment: A critical review of their distribution, sensing techniques, ecological effects and remediation. *Chemosphere.* 2022. Vol. 287. Art. No. 131996.
53. Tusiewicz K., Kuroпка P., Workiewicz E., Wachelko O., Szpot P., Zawadzki M., Nitrites: an old poison or a current hazard? Epidemiology of intoxications covering the last 100 years and evaluation of analytical methods. *Toxics.* 2023. Vol. 11. Art. No. 832.
54. Liu R.-T., Xu Z.-L., Li F.-M., Chen F.-Y., Yu J.-Y., Yan Y., Chen Y., Xia B.Y. Recent advances in proton exchange membrane water electrolysis. *Chem. Soc. Rev.* 2023. Vol. 52. P. 5652–5683.

2.7 ОЦІНЮВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ МОЖЛИВОСТЕЙ ХІМІЧНИХ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ РІДИННОГО ОЗДОБЛЕННЯ ШКІР

Заєць А. В.¹, Андрєєва О. А.²

¹Міністерство освіти і науки України

²Київський національний університет технологій та дизайну, Україна
zaiets.antonina888@gmail.com, wayfarer14@ukr.net

Проведено оцінювання технологічних можливостей низки нових промислових засобів для рідинного оздоблення шкір. За допомогою традиційних та сучасних методів аналізу встановлено, що, завдяки своїм будові та властивостям, застосовані під час наповнювання-додублювання акриловий полімер Syntan RS 540, а під час жирування модифіковані жири Sulphiol EG 60, Synthol LC здатні забезпечити належне формування структури та показники якості натуральної шкіри.

Ключові слова: рідинне оздоблення, полімерні сполуки, модифіковані жири, шкіряний напівфабрикат, шкіра, будова, властивості.

Аналіз останніх розробок в галузі технології процесів жирування, додублювання та наповнювання, як основних складових рідинного оздоблення натуральних шкір, виявив нагальну потребу у пошуку та реалізації більш ефективних сучасних жирувальних матеріалів і полімерних сполук [1-7]. Метою даного дослідження було оцінити технологічні можливості низки нових промислових засобів, призначених для проведення цього відповідального етапу шкіряного виробництва.

Для вирішення поставлених завдань у роботі застосували желатин як похідну та модель колагену, шкіряний напівфабрикат хромового методу дублення для верху взуття з сировини ВРХ та виготовлену з нього шкіру, а також нові хімічні матеріали: аніонні акрилові полімери Syntan RS 540, Bioplen ТМ та модифіковані жири (Sulphiol EG 60 на базі сульфитованих натуральних та синтетичних жирів; Synthol LC на основі натуральних та синтетичних жирів, сульфатованих тригліцеридів, лецитинвмісної суміші; Sulphiol С, одержаний з окиснених сульфитованих жирів морських риб). Для визначення особливостей будови та властивостей цих матеріалів, встановлення їх впливу на перебіг технологічних процесів, показники якості шкіряних матеріалів використали ряд традиційних та сучасних інструментальних методів аналізу, у тому числі спектроскопічний, хроматографічний та мікроскопічний методи.

За результатами лазерної кореляційної спектроскопії на аналізаторі ZetaSizer Nano-3, Malvern Instruments (Велика Британія) встановлено полімодальний характер розподілу частинок обох **полімерних сполук** за розміром, підтверджено аніонну природу Syntan RS 540 (дзета потенціал на рівні $-6,25 \pm 2,45$ мВ). Діаметр 82-95 % загального об'єму частинок цих полімерів знаходиться на рівні 0,91-1,12 нм, при цьому діаметр частинок Syntan RS 540 не перебільшує 10,81 нм, а Bioplen ТМ – 11,73 нм (табл. 1).

Тобто є підстава казати про доступність елементів надмолекулярної структури колагену дерми (понад 300 нм) досліджуваним сполукам.

Таблиця 1. Визначення ступеня дисперсності акрилових полімерів*

Полімер	Характер розподілу	Кількість фракцій	Діаметр частинок, нм	Відносний об'ємний вміст частинок, %
Syntan RS 540	Полімодальний	2	0,91	95,8
			10,81	4,2
Bioplen TM	Полімодальний	2	1,12	82,0
			11,73	18,0

* досліджували 10 %-ві розчини.

ІЧ-спектроскопічні дослідження будови акрилових полімерів проводили на приладі Spectrum BX Perkin Elmer (США) в діапазоні частот 400–4000 см⁻¹. Інтерпретацію одержаних спектрів виконували на підставі відкритих першоджерел з інфрачервоної спектроскопії [8-10]. На наявність у структурі полімерів певних функціональних угруповань вказує присутність на спектрограмах піків, яким відповідають валентні коливання групи ОН карбонових кислот; валентні коливання групи С=C алкенів, валентні коливання групи СО карбонових кислот, валентні та деформаційні коливання групи ОН спиртів тощо. Це свідчить про поліфункціональну природу задіяних у роботі полімерних сполук і дозволяє припустити їх взаємодію з колагеном.

При порівнянні спектрів вихідного хромованого желатину та обробленого певним поліакрилатом, а також відносної оптичної густини характеристичних смуг поглинання (табл. 2) виявлено певні перетворення у структурі желатину під впливом полімеру. Підвищення показника Z (понад 1) у разі зменшення відносної оптичної густини після оброблення желатину поліакрилатами пояснює взаємодію білка з цими матеріалами з утворенням нових зв'язків різних типів (водневих, електровалентних, ковалентних і т.і.). При збільшенні інтенсивності смуг на спектрограмах желатину після оброблення полімерними сполуками зменшення показника Z (менше 1) можна трактувати як руйнування існуючих зв'язків без утворення нових та/або прояв коливання певних угруповань цих реагентів. Отже, за результатами спектроскопічних досліджень системи «желатин-акриловий полімер» можна зазначити, що досліджувані полімерні сполуки здатні взаємодіяти з желатином, при цьому з боку останнього найбільшу участь у цій взаємодії беруть азотовмісні, меншою мірою кисневмісні групи; а з боку полімерів задіяні кисневмісні групи. В цілому, за показником Z полімер Syntan RS 540 в 7,2 рази активніший від Bioplen TM.

Сумісність акрилових полімерів з колагеном також оцінювали за температурою плавлення желатину, яка характеризує міцність зв'язків між желатином та застосованим матеріалом (у даному випадку акриловим полімером). Підвищення цього показника на 2 °С у разі використання

Syntan RS 540 вказує на дещо більшу взаємодію у системі «желатин-Syntan RS 540», ніж у системі «желатин-Bioplen ТМ».

Таблиця 2. Основні смуги поглинання в ІЧ-спектрах хромованого желатинупісля оброблення полімерами

Інтерпретація (природа груп та сполук) *	Зміна Z **	
	Syntan RS 540	Bioplen ТМ
3330-3400 с. Амід А (ν NH); іміни (ν C=N), що перекриваються між- та внутрішньомолекулярними водневими зв'язками бічних ланцюгів; 3200-3500 с., уш. ν OH спиртів (зв'язан.); 3400-3500 с. ν NH ₂ амінів первин.	6,24	0,73
3020-3100 сл. ν CH алкенів	4,21	0,60
2915-2940 с. $\nu_{ас}$ CH ₂ алканів	18,05	0,95
2854 срд. ν CH алканів	–	–
1650-1850 с. ν C=O карбонільних сполук	68,73	1,33
1554-1850 Амід ІІ (40 % ν CN, 60 % δ NH)	0,17	1,28
1448 Алкани (ν CH ₃), спирти (ν CO)	0,38	1,34
1405 спирти, феноли, кислоти (ν CO, δ OH)	0,34	1,32
1334 Алкани, алкени (ν CH ₂ , CH ₃)	–	–
1280 Аміни втор., трет. (ν CN); естери (ν COC)	1,26	0,24
1240 Амід ІІІ (10 % ν CO, 30 % ν CN, 30 % δ NH; 10 % ν O=CN); Аміни втор., трет. (ν CN); естери (ν COC); феноли (ν CO)	1,05	5,09
1204 Аміни втор., трет. (ν CN); кеталі, ацеталі; етери та естери діолів (ν CO)	0,74	0,28
1162 Спирти втор., трет. (ν CO)	1,13	0,69
1083 Спирти перв. (ν CO)	1,46	3,97
1033 Спирти перв. (ν CO)	0,96	0,46
971 N- Окиси аліфатичних амінів	1,13	0,53

* с. – сильні, уш. – уширені, срд. – середні, сл. – слабкі; ** Z – відношення відносної оптичної густини вихідного хромованого желатину до відносної оптичної густини хромованого желатину, обробленого акриловим полімером

Таблиця 3. Показники Красту, обробленого акриловими полімерами

Показник	Syntan RS 540	Bioplen ТМ
Межа міцності при розтягу σ_p , 10 МПа	1,30	1,20
Напруження при появі тріщин лицьового шару σ_l , 10 МПа	1,26	1,10
$\Delta\sigma = 100 \cdot [(\sigma_p - \sigma_l)/\sigma_p]$, %	3,1	8,3
Подовження при напруженні 10 МПа L_{10} , %	35,0	32,7
Коефіцієнт рівномірності розподілу K_p :		
- межа міцності при розтягу σ_p	0,62	0,59
- напруження при появі тріщин лицьового шару σ_l	0,60	0,44
- подовження при напруженні 10 МПа l_{10}	0,70	0,61

З метою встановлення технологічних можливостей полімерних сполук шкіряний напівфабрикат Вет-блу обробили за схемою: промивання - нейтралізація - промивання - жирування - додублювання - наповнювання із заміною традиційних танідів квебрахо на акриловий полімер - промивання. При цьому умови оброблення дослідних груп відрізнялися лише видом полімеру під час додублювання-наповнювання: рідинний коефіцієнт (РК) 1, температура 35-40 °С, тривалість 1,0 год, витрата полімеру 2,0 % у перерахунку на сухий залишок; перемішування постійне.

Під час експерименту ніяких ускладнень не виникало, одержаний Краст (шкіра без покриття) мав приємний гриф, чисті лицьову та бахтарм'яну поверхні. Після сушіння, зволоження та витягування досліджувані зразки піддавали фізико-механічному випробуванню на розривній машині, на підставі чого було встановлено покращення показників якості шкіри у разі додублювання-наповнювання засобом Syntan RS 540 у порівнянні з Bioplen ТМ (табл. 3).

Зменшення на 5,35 % відн. різниці $\Delta\sigma$ між показниками міцності шкіри в цілому σ_p та міцності її лицьового шару σ_l дозволяє передбачити більш рівномірний розподіл компонентів у структурі дерми, отже, покращення виходу по площі та використання дефіцитної шкіряної сировини у разі застосування Syntan RS 540.

Оскільки неоднорідність будови та властивостей шкур великої рогатої худоби негативно впливає на розкрійні властивості готової шкіри та витрати сировини, виникає нагальна потреба у вирівнюванні товщини та щільності шкіри по всій площі. З урахуванням цього, оцінювали наповнювальну здатність полімерних сполук за співвідношенням товщини струганого напівфабрикату Вет блу (знаменник) та Красту (чисельник) на різних топографічних ділянках: у полах, пахвинах та чепраку (табл. 4).

Таблиця 4. Наповнювальна здатність полімерів

Топографічна ділянка	Товщина, 10^{-3} м			
	Syntan RS 540		Bioplen ТМ	
Поли	1,17/0,97	+20,6 %	1,18/0,98	+20,4 %
Пахвини	1,16/0,95	+22,1 %	1,18/0,95	+24,2 %
Чепрак	1,19/1,01	+17,8 %	1,16/1,01	+14,9 %
Шкіра в цілому	1,17/0,98	+20,2 %	1,17/0,98	+19,8 %

Таким чином встановили, що обидві досліджувані полімерні сполуки здатні добре наповнювати шкіру, вирівнюючи її товщину по площі за рахунок більш повного поглинання полімеру на периферійних ділянках. Разом з тим, засіб Syntan RS 540 порівнянно з Bioplen ТМ демонструє кращі результати по показниках температури плавлення желатина, міцності та подовження шкіри, анізотропії показників фізико-механічних властивостей. Одержану інформацію у подальшому використали при створенні технології рідинного оздоблення шкіряного напівфабрикату з використанням у додублюванні-наповнюванні саме Syntan RS 540.

Під час дослідження основних фізико-хімічних властивостей **модифікованих жирів** встановили, що їх густина знаходиться на рівні 0,989-0,998 г/см³. Кожен жир має притаманний йому набір хімічних констант. Більш високий вміст активної речовини (82,0 і 85,0 %) спостерігається у засобах Sulphirool C та Synthol LC відповідно, менший (60,0 %) у Sulphirool EG 60. Хроматографічний аналіз цих матеріалів за допомогою СНN-аналізатора Vario MICRO cube (Elementar GmbH, Німеччина) вказує на те, що найбільший вміст вуглецю і сірки у продукті Sulphirool C: порівняно із іншими жирами цей показник вищий у 1,1-1,2 та 1,6-2,0 рази відповідно. За вмістом водню зразки жирів суттєво не відрізняються, оскільки цей показник знаходиться на рівні 10,54-10,92 %.

Враховуючи поширеність емульсійного способу жирування шкір, проаналізовано здатність модифікованих жирів до утворення емульсій, їх стійкості у часі та до дії електролітів. На основі оцінювання властивостей 5 %-вих жирових емульсій встановлено, що: *а)* всі досліджені модифіковані жири здатні утворювати гомогенні емульсії типу «масло/вода», стійкі у часі (не менше 15-20 хв, не більше 1 год); *б)* рН вихідних емульсій знаходиться в межах 5,8-6,6; додавання ПАР у кількості 2,0 % від маси жиру та коригування рН водним розчином аміаку до прийнятого на практиці значення 8,1-8,2 підвищує час життя емульсій на третину; це вказує на можливість використання таких емульсій у рідинному оздобленні; *в)* для запобігання руйнування емульсій недоцільно їх спільне використання із оцтовою та соляною кислотами, а також дубильними сполуками хрому на стадії переддубильно-дубильних та післядубильних процесів; *г)* використання оцтової кислоти можливе, як це і передбачено діючими методиками, наприкінці процесу жирування, коли розшарування емульсії сприяє досягненню бажаного технологічного ефекту.

За результатами лазерної кореляційної спектроскопії отримано дані стосовно дисперсності, дзета-потенціалу та характеру розподілу частинок жирових емульсій при кімнатній температурі; також виявлено зміну розміру та характеру розподілу частинок у режимі «нагрівання/охолодження» в діапазоні 20-60°C/60-20°C.

Під час дослідження впливу на дисперсність емульсій таких чинників, як вид жиру, концентрація та стан емульсії (вихідної та після коригування рН), встановлено наступні закономірності:

I. Емульсії вихідні, без коригування рН:

а) концентрація 5 %

- всі частинки емульсії Sulphirool EG 60 мають діаметр порядку 63,2 нм, діаметр 89,2 % частинок Synthol LC 31,9 нм, а 95,7 % Sulphirool C – 73,0 нм; середній гідродинамічний діаметр частинок всіх емульсій в межах 30,2-61,9 нм;- за середнім гідродинамічним діаметром емульсії можна розташувати у послідовності Sulphirool C > Sulphirool EG 60 > Synthol LC, при цьому частинки Sulphirool C в 1,13 рази більші від частинок Sulphirool EG 60 та в 2,05 рази від Synthol LC;

- найбільш однорідна емульсія Sulphirol EG 60 (один пік на спектрограмі), емульсії інших модифікованих жирів мають полімодальний характер (2-3 піки);

б) концентрація 25 %

- зі збільшенням концентрації емульсій Sulphirol EG 60 та Synthol LC з 5 % до 25 % середній гідродинамічний діаметр частинок зростає відповідно в 1,34 і 1,06 рази; разом з тим, діаметр 99,5 % частинок емульсії Sulphirol EG 60 не перебільшує 118,9 нм, а 97,4 % Synthol LC – 43,7 нм;

- обидві емульсії мають полімодальний характер (два піки на спектрограмі);

II. Емульсії після коригування рН:

а) концентрація 5 %

- діаметр всіх частинок Sulphirol EG 60 на рівні 57,7 нм; всі частинки Synthol LC мають діаметр 35,8 нм, а 77,6 % частинок Sulphirol C – 66,3 нм; середній гідродинамічний діаметр частинок знаходиться в межах 29,3-93,7 нм;

- зі збільшенням середнього гідродинамічного діаметра зберігається послідовність: Sulphirol C > Sulphirol EG 60 > Synthol LC;

- коригування рН призводить до більшої однорідності емульсії Synthol LC (лише один пік), підвищення середнього гідродинамічного діаметра частинок Sulphirol C в 1,51 рази та майже не впливає на цей показник у двох інших емульсіях;

б) концентрація 25 %;

- з підвищенням концентрації емульсій з 5 % до 25 % діаметр всіх частинок Sulphirol EG 60 дорівнює 116,0 нм, діаметр 86,0 % частинок Synthol LC не перебільшує 61,7 нм, а 87,4 % частинок Sulphirol C мають діаметр 61,7 нм; середній гідродинамічний діаметр частинок емульсії Sulphirol EG 60 підвищується в 1,76 рази, Synthol LC в 1,28 рази, а для Sulphirol C, навпаки, в 1,69 рази знижується;

- порівняно з вихідними емульсіями середній гідродинамічний діаметр частинок перших двох емульсій знаходиться у більш широкому діапазоні (37,6-91,0 нм проти 32,1-73,7 нм).

При проведенні технологічних процесів хімічні матеріали дифундують у пористу структуру дерми, формуючи її. При цьому, незважаючи на модифікацію шкіряних матеріалів під час обробки і навіть під час експлуатації виготовлених з них виробів, пориста структура дерми, взаємодіючи з різноманітними середовищами, зазнає відповідних змін. Тому для підвищення ефективності технологічних процесів, прогнозування експлуатаційних властивостей шкіри слід враховувати доступність структури дерми застосованим реагентам та характер взаємодій, що відбуваються у системі «колаген-хімічний матеріал».

З результатів лазерно-кореляційного аналізу випливає, що понад 86 % частинок 25 %-вих емульсій модифікованих жирів за своїми розмірами не перевищують 61,7-116,0 нм, тобто співрозмірні з макропорами дерми. Оскільки досліджувані жирові емульсії мають полімодальний характер розподілу частинок за розміром, в них зустрічаються і більш дрібні частинки

жиру, які можуть проникати крізь більш дрібні пори на інші рівні надмолекулярної структури дерми, додатково її формуючи. А з урахуванням різниці у будові та фізико-хімічних властивостях різних жирів можна передбачити посилення ефекту жирування у разі одночасного використання декількох жирувальних засобів завдяки доповнюванню один одного.

Глибина проникання та рівномірність розподілу жиру в структурі напівфабрикату значною мірою залежать від заряду емульсії, який визначається типом жиру або емульгатору (аніонний, катіонний, неіоногенний). Ось чому жирувальний матеріал або емульгатор слід підбирати з урахуванням методу дублення напівфабрикату та підготовки його поверхні. Заряд (дзета-потенціал) поверхні структурних елементів дерми обумовлений ступенем нейтралізації та природою тих хімічних матеріалів, якими напівфабрикат обробляли до жирування, наприклад, дубителів, наповнювачів, поверхнево-активних речовин, барвників і т.і. Чим менше різниця між дзета-потенціалом поверхні напівфабрикату і дзета-потенціалом частинок жирової емульсії, тим глибше в товщу дерми дифундує жир [11-12]. Експериментально встановлено, що всі емульсії мають аніонний заряд (дзета-потенціал на рівні $-26,5 \dots -46,6$ mV) (рис. 1) та, як зазначено вище, високодисперсні (середній діаметр частинок у межах 34,69-108,2 нм). Це дозволяє припустити, що емульсії з такими характеристиками здатні проникати крізь пори дерми вглиб колагенової матриці і, досягаючи елементів надмолекулярної структури, адсорбуватися та фіксуватися на їх поверхні завдяки наявності певних функціональних груп. Підвищення концентрації емульсій до 25 % сприяє укрупненню частинок, формуванню більш полідисперсного характеру їх розподілу та зниженню дзета-потенціалу, що, однак, не повинно негативно позначатися на технологічних можливостях цих матеріалів, кожен з яких має свої особливості.

Поверхневий натяг емульсій при температурі 25 °C знаходиться в межах $(33,7-37,2) \cdot 10^{-3}$ Н/м (рис. 2), тобто, досліджувані жири володіють фактично однаковою змочувальною здатністю. При підвищенні температури до 45 °C поверхневий натяг емульсій знижується на 3-5 % через зменшення сил міжмолекулярної взаємодії при збільшенні молекулярної теплової активності.

Оскільки температура суттєво впливає на перебіг технологічного процесу та якість шкіри, цікаво було оцінити властивості емульсій модифікованих жирів у більш широкому температурному діапазоні. З цією метою 5 %-ві та 25 %-ві емульсії поступово нагрівали протягом 2 год до температури 70 °C, витримуючи 2 хв при певній температурі для термостабілізації, і так само поступово охолоджували протягом 2 год до температури 20 °C. В результаті візуально встановили руйнацію емульсій після двогодинного нагрівання до 70 °C. Тому у подальшому цикл нагрівання проводили в діапазоні 20-60 °C, а цикл охолодження – 60-20 °C. Таким чином виявили тенденцію зменшення розміру частинок емульсій на 0,61-8,00 нм при нагріванні, що, скоріш за все, обумовлено зменшенням поверхневого натягу жиру. Виняток становило нагрівання 25 %-вої

емульсії Sulphirool EG 60, яке викликало агрегацію частинок, збільшення їх розміру на 10,2 %.

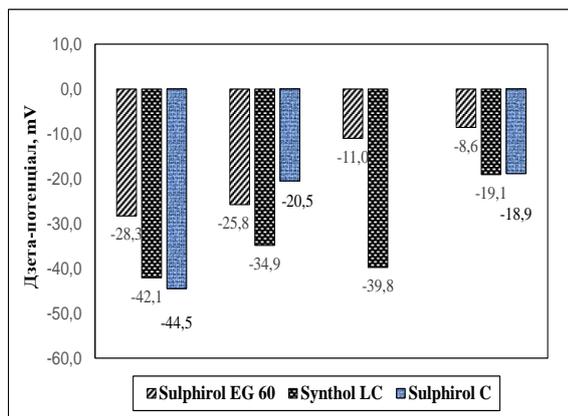


Рис. 1. Дзета-потенціал емульсій модифікованих жирів

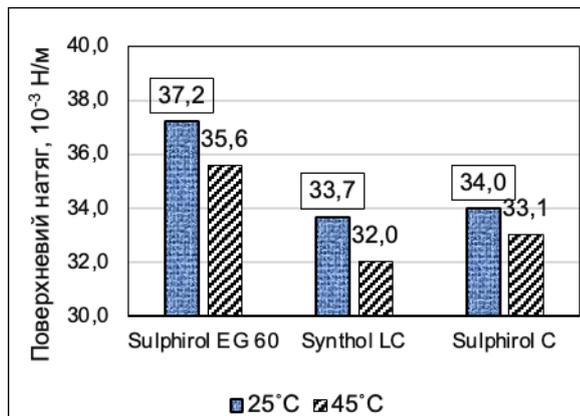


Рис. 2. Поверхневий натяг емульсій модифікованих жирів

Під час режиму «нагрів/охолодження» в діапазоні (20-60°C/60-20°C) виявили флуктуацію розміру крапель емульсії Sulphirool C, обумовлену їх коалесценцією або осадженням з утворенням більш крупних крапель. Таке ж явище мало місце при визначенні поверхневого натягу емульсії Sulphirool C у разі підвищення температури до 45 °C. Останнє викликало сумніви щодо стану такої емульсії під час жирування хромових шкір, яке зазвичай проводять при високій (45-60 °C) температурі. У той же час, на підставі одержаних даних можна передбачити, що зменшення поверхневого натягу емульсій Sulphirool EG 60 та Synthol LC при підвищеній температурі сприятиме їх розтіканню по поверхні шкіри та проникненню жиру в пори різного розміру без порушення стійкості емульсії на початку процесу жирування.

Для формування уявлення про хімічну природу модифікованих жирів та особливості їхньої взаємодії з колагеном провели ІЧ-спектроскопічні дослідження як самих жирів, так і плівок хромованого желатину після оброблення цими жирами, на підставі чого виявили: 1. Поліфункціональну природу модифікованих жирів через наявність цілої низки активних груп (гідроксильних спиртів, карбонільних залишків жирних кислот тригліцеридів, сірко- та фосфоровмісних і т.і.) та зв'язків, у тому числі подвійних; 2. Певні перетворення у структурі желатину та підвищення показника Z (понад 1) після оброблення желатину жирувальними матеріалами (табл. 5). Це можна пояснити взаємодією останніх з білком з утворенням різних (водневих, електровалентних, ковалентних і т.і.) зв'язків. Найбільшу участь у взаємодії із сірко- та фосфоровмісними групами жирів беруть азотовмісні (амінні, імінні, амідні) групи желатину, меншою мірою його кисневмісні (гідроксильні та карбонільні) групи. За зміною відносної оптичної густини хромованого желатину після оброблення жирами більша сумарна активність притаманна сульфатованому засобу Sulphirool EG 60 та сульфатованому лецитинвмісному засобу Synthol LC порівняно із засобом

Sulphirool C, синтезованим на базі окиснених і сульфітованих жирів морських риб.

Таблиця 5. Основні смуги поглинання в ІЧ-спектрах хромованого желатину після оброблення жирувальними матеріалами

Інтерпретація (природа груп та сполук) *	Зміна Z **		
	Sulphirool EG 60	Synthol LC	Sulphirool C
3330-3400 с. Амід А (ν NH); іміни (ν C=N); 3200-3500 с., уш. ν OH спиртів (зв'язан.); 3400-3500 с. ν NH ₂ амінів первин.	1,37	2,87	1,87
3020-3100 сл. ν CH алкенів	0,98	0,86	0,82
3000-3100 сл. ν CH алкенів	–	+	–
2915-2940 с. ν_{ac} CH ₂ алканів	1,00	1,00	0,99
2854 срд. ν CH алканів	–	–	+
1650-1850 с. ν C=O карбонільних сполук	–	–	+

* с. – сильні, уш. – ушпирені, срд. – середні, сл. – слабкі; ** Z – відношення відносної оптичної густини хромованого желатину (без оброблення модифікованим жиром) до відносної оптичної густини хромованого желатину після оброблення жиром

Як і у випадку полімерних сполук, здатність модифікованих жирів взаємодіяти з желатином, отже, і з колагеном, сприятиме попередженню перерозподілу цих реагентів в дермі, а це, у свою чергу, позитивно позначиться на стабільності її структури та властивостей на подальших стадіях життєвого циклу шкіри.

У наступній серії дослідження розглянули можливість спільного використання акрилового полімеру Syntan RS 540 та модифікованих жирів у рідинному оздобленні. Експеримент проводили за відомою методикою [13] у лабораторних умовах на пристрої, що забезпечує температурний режим та механічний вплив на напівфабрикат шляхом постійного перемішування, у послідовності: промивання - нейтралізація - промивання - додублювання-наповнювання - жирування. Оброблення дослідних груп 1-3 відрізнялось від контрольної групи 4 видом та витратою хімічних матеріалів (табл. б): так, для додублювання-наповнювання дослідних зразків застосували акриловий полімер Syntan RS-540, контрольних – таніди квебрахо; під час жирування задіяли відповідно нові модифіковані жири та поширений на практиці жирувальний засіб Provol VA. Витрати матеріалів визначали з урахуванням маси Вет блу, активності та сухого залишку реагентів.

Під час оброблення напівфабрикату ніяких відхилень не спостерігалось. Ступінь відпрацювання робочих розчинів був високий, одержані зразки Красту виявилися незамащеними, з чистою лицьовою поверхнею. При цьому дослідні зразки мали більш приємний гриф і шовковисту лицьову поверхню. Показники Красту після сушіння, зволоження та витягування наведено у табл. б, з якої видно, що зразки дослідних груп за своїми властивостями не поступаються зразкам контрольної групи, а у деяких випадках і перевершують їх.

Так, має місце підвищення вмісту незв'язаного жиру (речовин, що екстрагуються органічними розчинниками) на 11,4-37,1 %, межі міцності при розтягу на 7,7-20,0 %, подовження при напруженні 10 МПа на 13,2-21,2 %. І якщо у контрольних зразках спостерігалась різниця (6,2 %) між міцністю шкіри в цілому (при розриві) та її лицьового шару, у дослідних зразках вона була відсутня. Це може свідчити про більш рівномірний розподіл матеріалів у структурі дослідних шкір. Останнє цілком корелює з результатами розподілу жиру по окремих шарах дерми (коефіцієнт рівномірності *Кж*) та мікроскопічними дослідженнями. Це дозволяє прогнозувати підвищення виходу шкір по площі, тобто більш раціональне використання дефіцитної шкіряної сировини у разі використання нових жирувальних матеріалів.

Таблиця 6. Показники Красту, обобленого акриловим полімером та модифікованми жирами

Показник	Умови оброблення / Значення			
	Група 1	Група 2	Група 3	Група 4
	Syntan RS 540 – 2 %; Sulphirool EG 60 – 10 %	Syntan RS 540 – 2 %; Synthol LC - 10 %	Syntan RS 540 – 2 %; Sulphirool C - 10 %	Таніди квебрахо – 4 %; Provotol BA – 10 %
Масова частка*, %:				
- речовини, що екстрагуються органічними розчинниками	4,2	4,8	3,9	3,5
- оксид хрому	4,6	4,4	4,5	4,3
Межа міцності при розтягу σ_p , 10 МПа	1,56	1,40	1,48	1,30
Навантаження при появі тріщин лицьового шару σ_l , 10 МПа	1,56	1,40	1,48	1,22
$\Delta \sigma = 100 \cdot [(\sigma_p - \sigma_l) / \sigma_p]$, %	–	–	–	6,15
Подовження при напруженні 10 МПа, %	34,9	32,9	32,6	28,8
Товщина, 10^{-3} м	1,05	1,09	1,04	1,08
Вагове намокання 2 год, %	124,1	117,0	101,6	114,8
Температура зварювання, °С	110	111	109	106
Коефіцієнт рівномірності розподілу вмісту жиру по шарах дерми <i>Кж</i> , %	66,4	69,2	68,9	61,7

*у перерахунку на абсолютно суху речовин

Слід зазначити, що індивідуальне використання кожного із нових жирів має свої переваги. Так, порівняно з іншими жирувальними засобами Sulphirool EG 60 забезпечує дещо вищі показники фізико-механічних випробувань, проте, інші два засоби (Synthol LC та Sulphirool C) надають шкірі більш приємний гриф (що виявляється у більшій шовковисті та

ніжності її мереживки, наповненості) і рівномірний розподіл жиру по шарах дерми. І хоча за відношенням до дії води дослідні зразки дещо поступаються контрольним внаслідок своєї гідрофільності, за попереднім досвідом роботи з поліакрилатами [14] встановлено позитивний вплив заключного оздоблення на усунення цього недоліку, що й було підтверджено у нашій подальшій роботі [15].

На підставі одержаної інформації про будову, властивості і технологічні можливості досліджених полімерних сполук і модифікованих жирів розроблено ресурсозберігаючу технологію рідинного оздоблення шкір хромового методу дублення для верху взуття з сировини великої рогатої худоби, яка пройшла успішну апробацію в умовах діючого шкіряного підприємства.

Висновки. З використанням традиційних та сучасних інструментальних методів аналізу досліджено особливості будови, фізико-хімічні властивості, сумісність з колагеном та іншими реагентами низки нових промислових засобів, призначених для рідинного оздоблення шкіри, у вигляді акрилових полімерів і модифікованих жирів природного та синтетичного походження.

На підставі порівняльного аналізу досліджуваних засобів та особливостей взаємодії у системі «желатин-хімічний матеріал» обґрунтовано можливість та переваги використання у рідинному оздобленні:

- акрилового полімеру Syntan RS-540 для додублювання-наповнювання, який, завдяки аніонній природі, розподілу частинок за розміром та більшій активності у взаємодії з колагеном, демонструє кращі результати по температурі плавлення желатина, міцності, подовження та анізотропії основних показників фізико-механічних властивостей шкіри порівняно з Bioplen TM;

- модифікованих жирів Sulphirool EG 60 і Synthol LC для жирування, які, завдяки пропорційності розміру частинок емульсії розмірам структурних елементів дерми, більш активній взаємодії з колагеном, а також утворенню стійких при підвищеній температурі емульсій, здатні краще розтікатися по поверхні шкіри і проникати у різнорозмірні пори без ризику втрати стабільності емульсії на початку процесу жирування, з утворенням різноманітних зв'язків під час його проведення.

Результати дослідження використано у ресурсозберігаючій технології рідинного оздоблення шкір хромового методу дублення для верху взуття з сировини великої рогатої худоби, яка пройшла успішну промислову апробацію.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Mahboob S. Fatliquor Development from Hemp Oil to Produce High Quality Natural Finished Leather / S. Mahboob, S. Ahmad, R. Dewani, S. Soomro, M. Noushad, T. Ayaz, M. Pervez. *Indonesian Journal of Chemistry and Environment*. 2022. 5(1). P. 9–16.

2. Chen Z. Typical defects of natural phospholipid fatliquors in leather industry and their solutions / Z. Chen, T. Luo, X. Zhang, B. Peng, C. Zhang. *JALCA*. 2021. 116(11). P. 401–410.
3. Erciyas A. Eco-friendly nanosilica-filled lubricant for fatliquoring leather. *Materials Chemistry and Physics*. 2023. 295(1). P. 127194.
4. Wei C. Bifunctional amphoteric polymer-based ecological integrated retanning /fatliquoring agents for leather manufacturing: Simplifying processes and reducing pollution / C. Wei, X. Wang, W. Wang, S. Sun, X. Liu. *Journal of Cleaner Production*. 2022. 369. P. 133229.
5. M. Jianzhong, L. Hua. Elasticity studies on leather retanned with various types of acrylic polymers. *JALCA*. 2008. 103(11). P. 363-369.
6. Alam Md. Sayem, Sidding A. Mohammed, Baskar Geetha. The Physicochemical and Surface Properties Studies of Some Commercial Fatliquors. *Materials Focus*. 2016. 5(2). P. 171-176.
7. Заєць А., Андреева О. Традиційні підходи і новітні розробки в області рідинного оздоблення натуральної шкіри. *Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки*. 2023. 4(323). С. 131-138.
8. Silverstein R. M., Webster F. X., Kiemle D. J., Bryce D. L. Spectrometric Identification of Organic Compounds. 8th ed. Chichester : Wiley, 2014. 464 p.
9. Van Kempen T. A., McComas S. Infrared Spectroscopy as a Tool for Assessing Fat Quality. *Journal of Applied Poultry Research*. 2002. 11(2). P. 191–201.
10. Ластухін Ю. О., Воронов С. А. Органічна хімія. Львів : Центр Європи, 2006. 864 с.
11. Covington A. D., Wise W. R. Tanning Chemistry: The Science of Leather. 2nd ed. London : Royal Society of Chemistry, 2019. P. 554-571.
12. Журавський В. А., Касьян Е. Є., Данилкович А. Г. Технологія шкіри та хутра. К. : ДАЛПУ, 1996. 743 с.
13. Данилкович А. Г., Мокроусова О. Р., Охмат О. А. Технологія і матеріали виробництва. Київ : Фенікс, 2009. 580 с.
14. N. Pervaia, O. Andreyeva, L. Maistrenko, O. Mokrousova, S. Harkavenko, A. Nikonova. A unified technology of crust leather production using polymeric compounds development. *Leather and Footwear Journal*. 2019. 19 (3). P. 193–202.
15. A Zaiets, O. Andreyeva. Liquid leather finishing using polymers and modified fats. Proceedings of the 10th International conference on advanced materials and systems, 30-31 October 2024, Bucharest, Romania). *Sciendo*, 2024. P. 289-296.

2.8 ВИКОРИСТАННЯ ВІДПРАЦЬОВАНОГО СОРБЕНТУ ХАРЧОВОГО ВИРОБНИЦТВА ДЛЯ ОЧИЩЕННЯ СТІЧНИХ ВОД

Худоярова О. С.

Вінницький державний педагогічний університет
ім. М. Коцюбинського, Україна
olha.khudoiarova@vspu.edu.ua

Робота присвячена вирішенню питання поводження з відходами сорбентів харчової промисловості, визначенню можливості повторного їх використання в технологіях очищення стічних вод. Проблема накопичення відпрацьованих сорбентів частково вирішується шляхом відновлення їх сорбційних властивостей через регенерацію та модифікацію для використання в технологіях очищення стічних вод промислових виробництв від сульфід- і гідросульфід-іонів та купрум(II)-іонів з повторним використанням очищеної води в замкнених виробничих циклах та одержанням цінних технічних продуктів.

Ключові слова: *відпрацьований сорбент, регенерація, модифікація, повторне використання, очищення стічних вод.*

Охорона навколишнього середовища і раціональне використання природних ресурсів відноситься до однієї з глобальних проблем сучасності. Для багатьох країн світу гостро стоїть проблема утилізації відходів. Важливим завданням сучасного суспільства є як скорочення обсягів утворення відходів, так і використання вже накопичених, зокрема, для отримання корисних нетоксичних продуктів різного призначення.

В Україні склалася критична ситуація з утворенням, накопиченням, зберіганням, переробленням, утилізацією та захороненням відходів, яка характеризується подальшим розвитком екологічних загроз. Забруднення навколишнього середовища твердими промисловими відходами та стічними водами складає значне навантаження на довкілля. Для вирішення питання утилізації відходів в Україні в 2017 році розроблена Національна стратегія з управління відходами, що передбачає план до 2030 року. Необхідно вирішити питання утилізації відходів та гармонізувати політику поводження з відходами з європейськими вимогами [1].

Науково-практичним завданням сьогодення є зменшення техногенного навантаження, пов'язаного з накопиченням, поводженням та мінімізацією відходів. Відповідно до принципів «зеленої хімії» [2], відходи виробництва або вторинна промислова сировина повинні підлягати хімічній переробці, а не спалюванню та зберіганню на спеціальних полігонах.

Відпрацьовані сорбенти, що утворюються в результаті очищення продуктів харчової та інших галузей промисловості, найчастіше складають у спеціальних сховищах, або зберігають на звалищах. Проблема

накопичення відпрацьованих сорбентів може бути частково вирішена шляхом відновлення їх сорбційних властивостей для повторного використання в технологічних процесах очищення, наприклад стічних вод.

Для вирішення цієї проблеми виникає необхідність вивчення умов повторного використання сорбентів для очищення промислових стічних вод, наприклад, гальванічного виробництва від іонів купрум(II) та сульфідно-лужних розчинів нафтохімічних виробництв від сульфід-іонів.

Метою роботи є дослідження доцільності і ефективності повторного використання відпрацьованого сорбенту харчової промисловості на основі активованого вугілля та кізельгуру для очищення стічних вод окремих промислових виробництв та можливості часткового вирішення проблеми накопичення відходів сорбентів.

Матеріали і методи

Використані реактиви: натрію сульфід нонагідрат ($\text{Na}_2\text{S}\cdot 9\text{H}_2\text{O}$, х.ч., Україна), купруму(II) сульфат пентагідрат ($\text{CuSO}_4\cdot 5\text{H}_2\text{O}$, х.ч, Україна.), йод (I_2 , х.ч., Чилі), калій йодид (KJ, х.ч, Індія), натрію тіосульфат пентагідрат ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3\cdot 5\text{H}_2\text{O}$, х.ч., Україна), натрію етилендіамінтетраацетат дигідрат ($\text{C}_{10}\text{H}_{14}\text{N}_2\text{O}_8\text{Na}_2\cdot 2\text{H}_2\text{O}$, х.ч., Чехія), Мурексид ($\text{C}_8\text{H}_8\text{N}_6\text{O}_6$, х.ч., Україна), крохмаль ($(\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5)_n$, х.ч., Україна), амоній гідроксид ($\text{NH}_3\cdot \text{H}_2\text{O}$, х.ч., Україна), амоній хлорид (NH_4Cl , х.ч., Україна), натрій гідроксид (NaOH , х.ч., Україна), хлоридна кислота (HCl, 36-38%, Україна). Реактиви були придбані у ТОВ «Сфера Сім» (м. Львів, Україна).

Як відпрацьований сорбент було використано суміш активованого вугілля та кізельгуру після очистки цукрового сиропу, відібрану на підприємстві по виробництву безалкогольних газованих напоїв «Панда» (Вінниця, Україна).

Модельні розчини натрію сульфідіду та натрію гідросульфідіду за концентраціями сульфід- та гідросульфід-іонів 1,40 та 0,21 моль/дм³ відповідно з рН=12,6-13,2 були наближені до сульфідно-лужних розчинів нафтохімічних виробництв.

Модельні розчини купруму(II) сульфату за концентраціями Cu^{2+} -іонів в діапазоні 10-300 г/дм³ з рН=1,5-2,5 були наближені до промивних вод процесу електрохімічного міднення.

Прилади: лабораторна установка (рис. 1), що складається із реактора, обладнаного механічною мішалкою з електроприводом, крапельною лійкою для додавання модельних розчинів, дворогого форштоса, трубок для введення та відведення інертного газу N_2 та електронагрівального елемента. Друга частина універсальної установки складається із склянки Дрекселя і високошвидкісної магнітної мішалки. Склянка Дрекселя може бути використана для поглинання гідрогенсульфідіду, що виділяється із реактора, водним розчином купрум(II) сульфату із заданою концентрацією або розчином натрію гідроксиду.

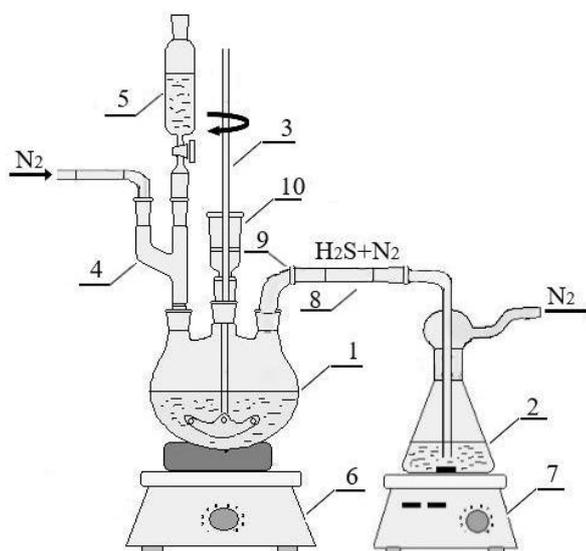


Рис. 1. Лабораторна установка для дослідження адсорбційного очищення модельних розчинів:

1 – реактор; 2 – склянка Дрекслея; 3 – механічна мішалка з електроприводом; 4 – дворогий форштос; 5 – крапельна лійка; 6 – електронагрівальний елемент; 7 – магнітна мішалка; 8 – з’єднувальна трубка; 9 – перехідник; 10 – муфта (гідрозатвор)

Зважування речовин проводилось на аналітичних вагах AS 220.R2 (RADWWAG, Польща). Для перемішування використовували високошвидкісну магнітну мішалку VELP AREC (VELP Scientifica, Італія).

Методи: залишкову концентрацію сульфід- та гідросульфід-іонів у фільтраті визначали методом йодометричного титрування; залишкову концентрацію іонів купруму(II) у фільтраті після очищення води визначали методом комплексометричного титрування; модифіковану поверхню сорбентів досліджено методом дифузного відбиття на ІЧ-фур’є-спектрометрі Nicolet iN 10FX від Thermo Fisher Scientific у діапазоні $4000\text{--}525\text{ см}^{-1}$ з максимальною роздільною здатністю 4 см^{-1} ; дослідження поверхні зразків сорбентів методом рентгенофазового аналізу було проведено на дифрактометрі Дрон-3.

Методика регенерації відпрацьованого сорбенту. Регенерацію сорбенту проведено за методикою, описаною в роботах [3, 4]. Спочатку сорбент промивали водою, а потім додавали послідовно 1% NaOH та 4% HCl. Раціональні параметри регенерації: масове співвідношення сорбент : $\text{H}_2\text{O} = 1:4$; час регенерації 45–60 хв; температура процесу $50\text{--}60^\circ\text{C}$; інтенсивність перемішування реакційної маси 200 об/хв. Після фільтрування, промивання водою та сушіння при 105°C отримували регенований сорбент (РС).

Методика вилучення іонів купруму(II) з модельних розчинів. Вилучення іонів купруму(II) з модельних розчинів проведено відповідно до методики, описаної в роботі [5]. До 10 г регенованого сорбенту (РС) додавали 100 см^3 модельного розчину купрум(II)-іонів. Одержану суміш інтенсивно перемішували (350 об/хв) впродовж 30–45 хвилин за температури $20\text{--}25^\circ\text{C}$ та залишали її для остаточного закінчення процесу

на одну добу за тієї ж температури. Суміш фільтрували під вакуумом і визначали у фільтраті залишкову концентрацію іонів Cu^{2+} . На основі одержаних експериментальних даних розраховували ступінь вилучення E (%) купрум(II)-іонів з розчину і адсорбційну ємність сорбенту Γ (мг/г).

Методика вилучення сульфід- і гідросульфід-іонів з модельних розчинів (отримання модифікованого сорбенту - МС). Вилучення сульфід- і гідросульфід-іонів з водних розчинів проведено відповідно до методики, описаної в роботі [6]. До 10 г РС через крапельну лійку додавали окремими порціями ($\sim 30 \text{ см}^3$) модельний сульфідно-лужний розчин. Реакційну масу перемішували швидкісною мішалкою протягом 5–15 хв за температури 20–25 °С. Потім відбирали пробу і проводили якісний аналіз реакційної маси на наявність в ній сульфід- і гідросульфід-іонів. Потім додавали чергову порцію сульфідно-лужного розчину. Повне сорбування сульфід- і гідросульфід-іонів поверхнею сорбенту вважали завершеним за наявності в розчині сульфід- і гідросульфід-іонів. Осад [(сорбент) + S^{2-} , HS^-] (модифікований сорбент – МС) відфільтровували на фільтрі Шотта і висушували. Визначали ступінь вилучення сульфід-і гідросульфід-іонів.

Методика вилучення іонів купруму(II) на модифікованому сорбенті (МС). Вилучення купрум(II)-іонів з водних розчинів на модифікованому сорбенті проведено відповідно до методики, описаної в роботі [7]. В реактор поміщали 10 г модифікованого сульфід- та гідросульфід-іонами сорбенту. Потім із крапельної воронки додавали першу порцію ($\sim 30 \text{ см}^3$) модельного розчину з вмістом купрум(II)-іонів 150,0 мг/дм³. Реакційну масу перемішували швидкісною мішалкою протягом 5–15 хв за температури 20–25 °С. Після цього відбирали пробу і проводили якісний аналіз реакційної маси на наявність в ній не зв'язаних іонів купруму(II). Потім додавали чергову порцію розчину з аналогічною послідовністю проведення операцій. Розраховували ступінь вилучення E (%) купрум(II)-іонів з розчину.

Результати та обговорення

Для дослідження ефективності регенерації відпрацьованого сорбенту визначали його сорбційну ємність за йодом. Використаний метод регенерації відпрацьованого сорбенту дозволяє на 100% відновити його сорбційну ємність з виходом 98%. Відновлення сорбційної ємності після регенерації пояснюється проходженням кислотно-основних хімічних реакцій на поверхні сорбенту та вимиванням продуктів їх взаємодії водою. Дані рентгенофазового аналізу (рис. 2) [3] підтверджують аморфний стан активованого вугілля, а також наявність у лівій частині дифрактограм кізельгуру основного піка кристоболіту SiO_2 , що розміщується при 26 ° та характеризує вихідний сорбент (дифрактограма 1) та регенований сорбент (дифрактограма 3).

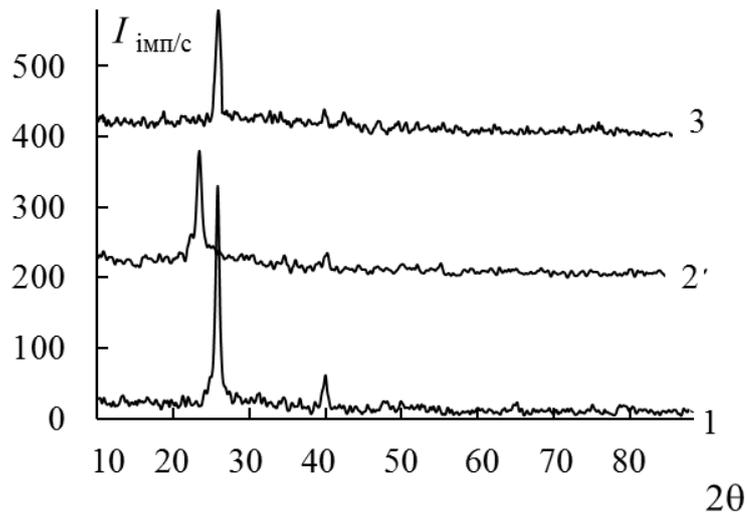


Рис. 2. Рентгенівські дифрактограми:

1 – вихідний сорбент; 2 – нерегенерований сорбент, промитий водою; 3 – регенерований сорбент (РС). Дифрактограми 2, 3 зміщені по осі Y на 100 імп/с

Однак, на дифрактограмі 2 нерегенерованого сорбенту цей пік зсувається до більш низьких значень дифракційних кутів: від 26° до 23° . Таким чином, положення цього основного піка кристалоїту SiO_2 в розглянутих дифрактограмах можна вважати надійним маркером, що вказує на ефективність регенерації відпрацьованого сорбенту.

Для дослідження ефективності повторного використання регенерованого сорбенту для очищення стічних вод від хімічних забруднювачів, було проведено адсорбційне очищення модельних розчинів, які містили купрум(II)-, сульфід- і гідросульфід-іони.

Адсорбційне вилучення іонів купруму(II) з модельних розчинів в розглянутому діапазоні концентрацій показало низьку ефективність (табл. 1). Відновлений сорбент має низьку здатність адсорбувати іони купруму(II) з розчинів через зміни у складі поверхневих груп після кислотно-лужної активації. Отримані дані свідчать про незначну адсорбцію Cu^{2+} на сорбенті РС, що пояснюється як природою адсорбату, так і морфологією адсорбенту після його кислотно-лужної активації. Очевидно, що досліджуваний нами сорбент РС проявляє катіонообмінні властивості. Ступінь спорідненості іонів Cu^{2+} до цього сорбенту високий, але функціональних груп, що забезпечують цю спорідненість, мало. В області низьких значень рН ступінь сорбції невеликий, оскільки карбоксильні та фенольні групи сорбенту протоновані, при досить низьких концентраціях купруму(II) іони гідрогену конкурують за вільні сорбційні центри. Отже, без додаткового активування (модифікації) матричної поверхні регенерованого сорбенту використання даного методу не доцільне.

Досліджено сорбційне очищення сульфідно-лужних розчинів від сульфід- та гідросульфід-іонів з використанням РС. Отримані результати подано в табл. 2. Аналіз даних підтверджує ефективне використання дослідженого РС. Так, ступінь вилучення сульфід- та гідросульфід-іонів

досягає 94-96 %, що вказує на високу ефективність процесу та на можливість його практичного використання.

Таблиця 1. Адсорбція купрум(II)-іонів на регенованому сорбенті (РС)

Концентрація Cu^{2+} , мг/дм ³		Ступінь вилучення E , %	Адсорбційна ємність Γ , мг/г
Початкова (C_0)	Рівноважна (C_p)		
10	9,40	5,7	0,057
30	26,90	10,4	0,312
50	44,20	11,6	0,58
150	115,05	23,3	3,50
300	209,8	31,3	9,39

Таблиця 2. Результати очищення сульфід- та гідросульфідвмісних модельних розчинів адсорбцією на регенованому сорбенті (РС)

Маса сорбенту, г	Вихідна концентрація в розчині до очищення			Концентрація в розчині після очищення			
	$[S^{2-}]_0$ моль/дм ³	$[HS^-]_0$ моль/дм ³	$[S_{заг}]_0$ моль/дм ³	залишкова концентрація в розчині, моль/дм ³		$[S_{заг}]_3 - [S_{заг}]_3$ моль/дм ³	ступінь вилучення E , %
				$[S^{2-}]_3$	$[HS^-]_3$		
1	1,40	0,21	1,61	0,79	0,16	0,66	41,0
5	1,40	0,21	1,61	0,53	0,14	0,94	58,4
10	1,40	0,21	1,61	0,24	0,10	1,27	78,9
15	1,40	0,21	1,61	0,17	0,09	1,35	83,9
20	1,40	0,21	1,61	0,12	0,05	1,44	89,1
25	1,40	0,21	1,61	0,06	0,03	1,52	94,4
30	1,40	0,21	1,61	0,05	0,02	1,54	95,7

Рентгеноструктурний аналіз підтверджує наявність на поверхні регенованого сорбенту піків, характерних для Na_2S (рис. 3)[8].

Хімія поверхні має суттєвий вплив на властивості сорбентів і визначає їх поведінку у різноманітних фізико-хімічних процесах. Присутність навіть незначної кількості тих або інших поверхневих груп або атомів може суттєвим чином впливати на характеристики сорбенту та докорінно змінювати параметри процесів за їх участю. Модифікація також розширяє спектр сполук, що можуть бути іммобілізовані на поверхні сорбенту. На поверхні сорбенту утворюються різні функціональні групи, які сприяють утворенню міцних зв'язків із забруднювачами різних типів за рахунок сил хімічної взаємодії.

Для підвищення ефективності видалення іонів купруму(II) з модельних розчинів використали модифікований сорбент (МС) - [(сорбент) + S^{2-} , HS^-]. Ступінь адсорбції сульфідних та гідросульфідних іонів на поверхні регенованого сорбенту на стадії модифікації становив 95,7%, адсорбційна ємність сорбенту становила 163,2 мг/г.

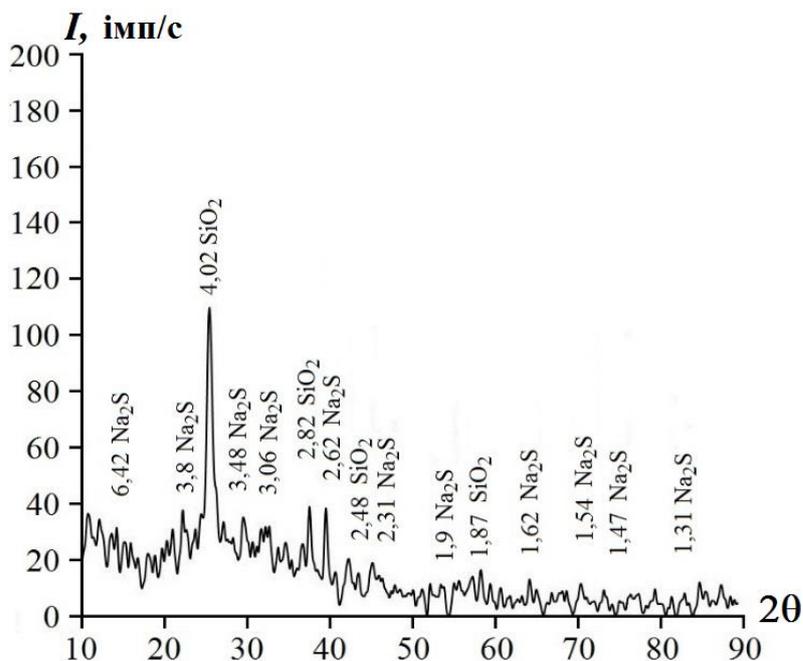


Рис. 3. Рентгенівська дифрактограма сполуки Na_2S на поверхні регенованого сорбенту (РС)

Як показали результати досліджень, модифікація поверхні більш активними сульфід- та гідросульфід-іонами призводить до значного підвищення її адсорбції відносно іонів купруму(II). Адсорбція починається з утворення сорбційного комплексу між сорбатом (Cu^{2+}) і первинно активованим центром сорбенту. Модифікована поверхня сорбенту містить велику кількість сульфідних лігандів, які і забезпечують швидку адсорбцію іонів Cu^{2+} . Враховано можливу каталітичну дію активованого вугілля на проходження топохімічних перетворень на поверхні сорбенту. Фізико-хімічна модифікація поверхні матриці відбувається через утворення координаційного центру $\text{CuS}_2(\text{HS})_2(\text{H}_2\text{O})_2$ (схема 1.). При цьому на поверхні сорбенту будуть утворюватися купруму(II) сульфід та елементарна сірка. Модифікація поверхні РС сульфурвмісними іонами (S^{2-} , HS^-) дозволила збільшити ступінь вилучення катіонів купруму(II) у 65,5 рази.

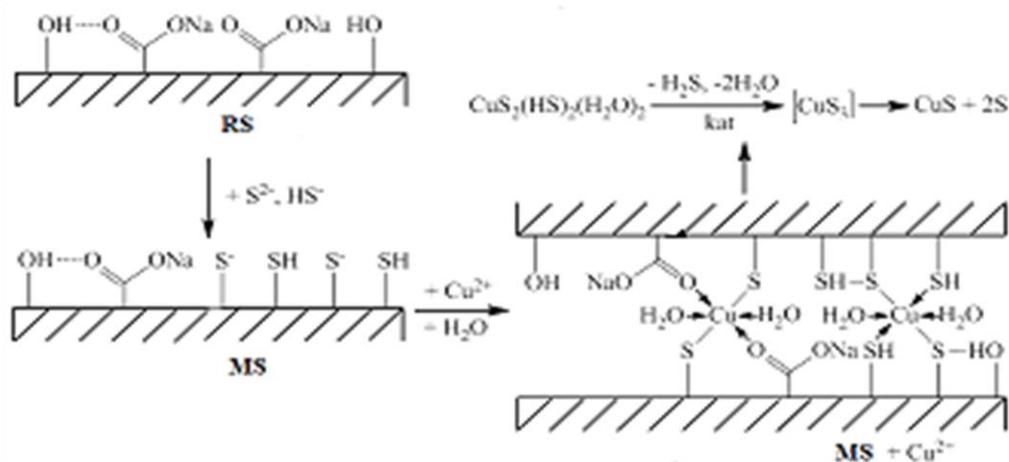


Схема 1. Фізико-хімічна модифікація поверхні РС та адсорбція іонів Cu^{2+} на МС

Рентгенівські дослідження підтверджують наявність купруму(II) сульфідів та елементарної сірки на поверхні модифікованого сорбенту після видалення іонів купруму(II) з розчину [5] (рис. 4) та підтверджують проходження топохімічних перетворень.

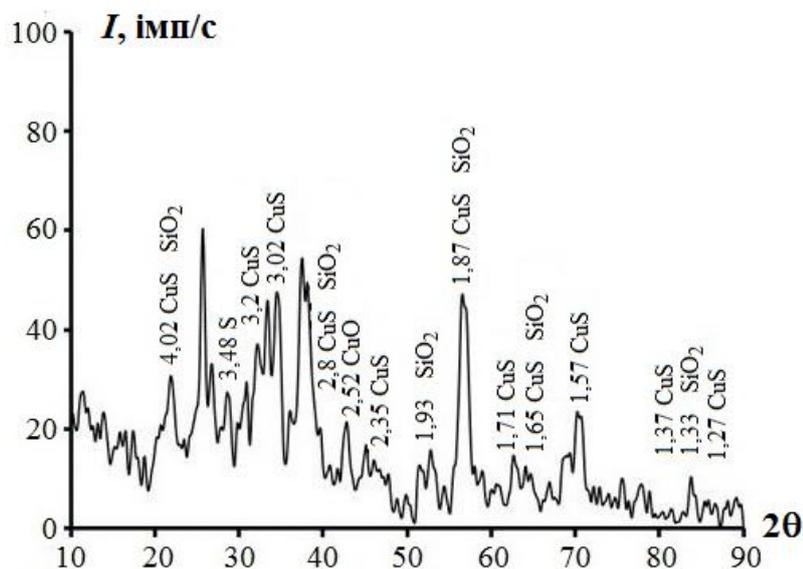


Рис. 4. Рентгенівська дифрактограма сполук CuS і S на поверхні регенерованого сорбенту

Можливість проходження топохімічних перетворень була встановлена також за допомогою ІЧ-спектральних досліджень. У досліджуваних зразках спостерігалися характерні валентні коливання органічних функціональних груп: $-OH$, $-C(=O)O-$ та валентні коливання хімічних зв'язків $Si-O$, $C-S$, $Cu-S$ (табл. 3).

Таблиця 3. Характеристичні коливання функціональних груп ІЧ-Фур'є спектрів дифузного відбиття

Об'єкт дослідження	Коливання функціональних груп в ІЧ-Фур'є спектрах, cm^{-1}				
	$\nu(-OH)$	$\nu(-C(=O)O)$	$\nu(Si-O)$	$\nu(C-S)$	$\nu(Cu-S)$
Регенерований сорбент (РС)	3410, 3196	1510	1045	–	–
Модифікований сорбент (МС)	3390	1550	1045	744	–
РС + CuS + S	3110	1550	1045	770	590

Отриманий продукт водоочищення - сорбент із сорбованими на його поверхні сіркою та купрум(II) сульфідом може бути використаний як компонент пластичних мастил спеціального призначення [9-11].

Висновки. Проблема накопичення відпрацьованих сорбентів частково вирішується шляхом відновлення їх сорбційних властивостей через регенерацію. Адсорбційне очищення із застосуванням

регенерованого сорбенту харчової промисловості є найефективнішим розв'язанням проблеми запобігання забрудненню водоймищ стоком, що містить сульфід- і гідросульфід-іони. Ефективність сорбентів може бути суттєво збільшена фізичними або хімічними методами активування або модифікування поверхні. Отримані результати дозволяють рекомендувати модифікацію вуглецевих сорбційних матеріалів сульфурвмісними іонами (S^{2-} , HS^-) для більш повного сорбційного вилучення Cu^{2+} - іонів із стічних вод. Очищені таким методом стічні води можуть бути повторно використані в системах технічного водопостачання промислових підприємств [12]. Таке рішення є економічно і екологічно вигіднішим, оскільки скорочується споживання природної води, а також потрібно менш глибоке її очищення порівняно з варіантом скидання у водоймище. Результати дослідження також можуть бути використані в комплексному очищенні стічних вод від іонів Cu^{2+} , S^{2-} , HS^- методом сорбції. Важливо не тільки очищати воду та використовувати її повторно в замкнених виробничих циклах, а й не створювати додаткові тверді відходи у вигляді відпрацьованого сорбенту. Твердий продукт водоочищення може бути використаний для одержання цінних складових, наприклад, компонентів мастил спеціального призначення.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Власенко І.В., Постова В.В. Аналіз сучасних інноваційних методів утилізації відходів. *Економіка і організація управління*. 2020. № 3 (39). С. 30–40.
2. Warner J., Cannon A., Dye K. Green Chemistry. *Environmental Impact Assessment Review*. 2004. P. 775–799. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2004.06.006>
3. Худоярова О.С. Комплексне сорбційне очищення промислових стічних вод від сульфід- та купрум(II)-іонів: дис.... к.т.н.: 05.17.21. Вінниця, ВДПУ. 2021. 170 с.
4. Ранський А.П., Худоярова О.С., Гордієнко О. А., Крикливий Р.Д. Спосіб регенерації суміші активованого вугілля та кізельгуру від органічних забруднювачів. *Патент України № 134391 МПК (2017.01), (2006.01)/ 10.05.2019*.
5. Khudoiarova O., Blazhko O., Blazhko A. Using of Waste Sorbent from Food Industry for the Removal of Copper Ions from Water. *Chemistry Journal of Moldova. General, Industrial and Ecological Chemistry*. 2025. 20(1). P. 95–99. DOI: <https://doi.org/10.19261/cjm.2025.1250>
6. Худоярова О.С., Гордієнко О. А., Блашко А. В., Панченко Т. І., Ранський А. П. Десульфуризація промислових водно-лужних розчинів та отримання нових пластичних мастил. *Водопостачання і водовідведення: проектування, будівництво, експлуатація, моніторинг: матеріали 3-ї міжнародної науково-практичної конференції*. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2019. С. 318–319.
7. Худоярова О.С., Гордієнко О.А., Сидорук Т.І., Тітов Т.С., Ранський А.П. Модифікація поверхні сумішних сорбентів сульфід-іонами для очищення гальванічних промивних вод процесу міднення. *Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»*. Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження. 2020. № 2(19). С. 36–46.
8. Khudoiarova O., Blazhko O., Blazhko A. Evaluation of the Efficiency of the Reuse of Sorbents and their Modified Forms for the Removal of Copper Ions from Water. *Orbital: Electron. J.Chem.* 2025. 17(1). P. 100–106. DOI: <http://dx.doi.org/10.17807/orbital.v17i1.22002>

9. Ранський А.П., Гордієнко О.А, Худоярова О.С., Крикливий Р.Д. Композиційні матеріали та консистентні мастила з підвищеними трибологічними властивостями. *Проблеми довговічності матеріалів, покриттів та конструкцій: матеріали VI-ої Міжнародної конференції*, 13-15 вересня 2018 р., Вінниця, Україна. Ч. 1. ВНТУ, Вінниця, 2018. С. 61–62.
10. Khudoyarova Olga, Gordienko Olga, Blazhko Alina, Sydoruk Tetiana, Ranskiy Anatoliy. Desulfurization of industrial water-alkaline solutions and receiving new plastic oils. *Journal of Ecological Engineering*. 2020. 6. P. 61–66. DOI: <https://doi.org/10.12911/22998993/123254>
11. Khudoiarova O., Blazhko O., Blazhko A. Receiving of new carbon-sulfur-containing plastic lubricants based on regenerated products and used sorbents. *Key Engineering Materials*. 2023. 944. P. 51–58. DOI: <https://doi.org/10.4028/p-8hu326>
12. Khudoyarova O.S., Ranskiy A.P., Gordienko O.A. Technology of complex sorption treatment of industrial wastewater from sulphide and Copper (II)-iones. *Water and water purification technologies. Scientific and Technical News*. 2021. 30 (2). P. 18-26. DOI: <https://doi.org/10.20535/2218-930022021237814>

2.9 ВПЛИВ ПОЛІМЕРНИХ ЗВ'ЯЗУЮЧИХ НА СТАБІЛЬНІСТЬ КОМПОЗИТНИХ АНОДІВ ЛІТІЙ-ІОННИХ АКУМУЛЯТОРІВ

Нікулін Д. О., Ляшок М. О., Костенко А. О., Хоменко В. Г.

Київський національний університет технологій та дизайну, Україна
v.khomenko@i.ua

У даній роботі досліджено вплив різних полімерних зв'язуючих (на електрохімічну стабільність анодів. Показано, що вибір полімеру суттєво впливає на адгезію активного шару до струмовідводу та циклічну стабільність. Результати демонструють, що полімери на водній основі з функціональними групами (наприклад, $-\text{COOH}$) забезпечують сильні водневі/йонні взаємодії з поверхнею Si, графіту та струмовідводу, підвищуючи механічну стабільність електрода та уповільнюючи деградацію ємністю. Морфологічний аналіз підтвердив, що міцні полімерні мережі запобігають утворенню тріщин і відшаруванню активного шару.

Ключові слова: літій-іонний акумулятор; кремній-вуглецевий анод; кремнійовмісні графітові аноди, полімерне зв'язуюче, адгезія.

Розвиток літій-іонних акумуляторів високої енергетичної щільності зумовлює необхідність пошуку нових анодних матеріалів із підвищеною питомою ємністю. Кремній привертає особливу увагу як перспективний анодний матеріал, оскільки його теоретична ємність (~ 3579 мА·год/г при формуванні сполуки $\text{Li}_{4.4}\text{Si}$) у десять разів перевищує ємність графіту [1-5]. Крім того, кремній має низький потенціал розряду та є одним із найпоширеніших елементів у природі, що робить його привабливим для застосування у джерелах живлення електротранспорту та системах накопичення енергії [6].

Разом із тим практичне впровадження кремнію у складі анодів обмежується низкою проблем. Під час літіювання кремній зазнає значного об'ємного розширення ($\sim 300\text{--}400\%$), що призводить до подрібнення частинок, руйнування твердого електролітного інтерфейсу (SEI) та втрати електричного контакту між активним матеріалом і провідником [1,7]. Унаслідок цього спостерігається зниження питомої ємності та коефіцієнта кулонівської ефективності при циклуванні. Для часткового усунення цих недоліків кремній, як правило, поєднують із графітом у складі композитних Si/C-анодів, що дозволяє буферизувати об'ємні зміни й підтримувати електропровідну структуру [8].

Одним із ключових елементів анодного електрода є полімерне зв'язуюче, яке забезпечує скріплення частинок активного матеріалу між собою та з металевим струмовідводом, зберігаючи механічну цілісність електрода. Традиційно в графітових анодах застосовується полівініліденфторид (ПВДФ), який розчиняється у N-метилпіролідоні та утворює міцну гнучку плівку [9]. Цей полімер є хімічно стійким і добре

працює в потенційному діапазоні графітових анодів, проте для кремнієвих систем його ефективність виявилася недостатньою [4]. Механізм зв'язування ПВДФ із частинками кремнію ґрунтується переважно на слабких міжмолекулярних силах, тому при великому об'ємному розширенні зв'язка руйнується: активний шар відшаровується від струмовідводу у структурі з'являються тріщини, що порушує електропровідність і спричиняє деградацію батареї [4, 10]. Крім того, ПВДФ не забезпечує стабільного твердого електролітного інтерфейсу, і в процесі циклування спостерігається повторне його руйнування, що супроводжується додатковими втратами електроліту [8,11]. Тому численні дослідження наголошують на необхідності заміни ПВДФ на альтернативні полімерні зв'язуючі, більш сумісні з кремнієм за механічними та хімічними властивостями [12, 13].

У останні роки досягнуто значного прогресу у створенні спеціалізованих полімерних зв'язуючих для кремнієвих анодів. Їх умовно поділяють на три основні групи: (1) лінійні водорозчинні полімери з полярними функціональними групами, що формують водневі зв'язки з оксидним шаром на поверхні кремнію (карбоксиметилцелюлоза, поліакрилова кислота, альгінат натрію, полівініловий спирт) [14]; (2) розгалужені або зшиті полімери, які утворюють тривимірну еластичну сітку, здатну компенсувати об'ємні деформації частинок Si [15-18]; (3) композитні та багатофункціональні зв'язуючі з електропровідними або самовідновлюваними властивостями [12]. Встановлено, що поліакрилова кислота завдяки численним карбоксильним групам утворює водневі та йонні зв'язки з поверхневими сполуками літію, забезпечуючи високу адгезію та стабільність інтерфейсу [3,15]. Зшиті полімери на основі полівінілового спирту, модифіковані дикарбоновими кислотами, демонструють підвищену гнучкість і міцність, що дозволяє досягти стабільної роботи анода навіть після сотень циклів [16,17]. У новітніх розробках застосовуються також зв'язуючі з функціональними групами, здатними до багаторазового утворення водневих зв'язків (уреїдопіримідонові або бороновані сполуки), які забезпечують самовідновлення структури електрода й стабільність електричного опору протягом тривалого циклування [8, 9].

Метою цієї роботи є комплексне дослідження впливу різних типів полімерних зв'язуючих на електрохімічну поведінку композитних кремній-вуглецевих анодів. Основну увагу приділено порівнянню ПВДФ з водорозчинних систем на основі карбоксиметилцелюлози з бутадієн-стирольним каучуком, поліакрилової кислоти та їх суміші, що може мати підвищену еластичністю чи здатністю до самовідновлення. Проаналізовано їхній вплив на адгезійні властивості, циклічну стабільність ємності, Отримані результати дозволяють сформулювати практичні рекомендації щодо вибору полімерних зв'язуючих для підвищення стабільності та довговічності літій-іонних акумуляторів.

Матеріали та методи

Для виготовлення анодів використовували високочистий природний графіт GZI-99, отриманий шляхом хімічного очищення графітового

концентрату марки GAK-2 та подальшого подрібнення. Очищення проводили кислотною обробкою з добавкою амоній фториду; після сушіння матеріал подрібнювали у струйному млині до середнього розміру частинок 17 мкм. Перед змішуванням графіт висушували у вакуумі при 120°C протягом 12 год. Нанокремній (сферичні частинки приблизно 10-50 нм) також попередньо висушували у вакуумі при 120°C; як провідну добавку використовували графітізовану сажу С65.

Електродну масу готували у ваговому співвідношенні графіт (90%), сажа (2%), полімер (8%). Вміст кремнію в графіті складав близько 3%, забезпечує помірне підвищення теоретичної ємності (приблизно 450 мА•год/г) при збереженні електропровідності та контрольованих об'ємних деформацій. Досліджували чотири типи полімерних зв'язуючих:

- Полівініліденфторид (ПВДФ, марка KF9300): полімер розчиняли у N-метилпіролідоні до утворення 5% розчину. Це зв'язуюче використовували як контрольний зразок.

- Система натрій-карбоксиметилцелюлоза / стирол-бутадієновий каучук (Na-КМЦ/СБК, співвідношення 1:1 за масою): натрій-карбоксиметилцелюлозу розчиняли у деіонізованій воді при температурі близько 80 °С до повного набухання, після чого додавали латекс стирол-бутадієнового каучуку та проводили гомогенізацію суміші. Така комбінація забезпечує поєднання жорсткого структурного каркаса (завдяки КМЦ) з еластичною складовою (СБК), що підвищує механічну стійкість електродного шару та зменшує ризик його відшарування.

- Поліакрилова кислота (ПАК, середньомолекулярна маса близько 450 кДа): використовували водний розчин полімеру. Висока густина карбоксильних груп забезпечує утворення міцних водневих і йонних зв'язків з поверхнею частинок SiO_x, що підвищує адгезію та стабільність електродного шару.

- Поліакрилат літію (РААLi): отримували нейтралізацією водного розчину поліакрилової кислоти гідроксидом літію до рН ≈ 7. Утворена літієва сіль поліакрилової кислоти має високу еластичність і водночас зберігає здатність до утворення водневих зв'язків між ланцюгами полімеру. Така структура сприяє пружному поглинанню деформацій, стабілізує контакт між активними частинками Si і струмознімачем та забезпечує підвищену довговічність анодів.

Активні компоненти змішували з розчином відповідного зв'язуючого до утворення однорідної пасти. Для ПВДФ-системи застосовували планетарний міксер (1 год, 200 об/хв), для водних систем - механічне змішування проводили циклічно тричі по 30 хв і ультразвукову диспергацію (5 хв). Пасту наносили методом доктор-блейд на мідну фольгу товщиною 14 мкм з питомою масою активних речовин приблизно 2,0 мг/см². Водні плівки первинно сушили при 50°C, ПВДФ-системи - при 80°C; далі вакуумували при 120°C протягом 12 год. З пресованої стрічки вирізали дискові електроди діаметром 16 мм. Типова товщина електроактивного шару становила 50-60 мкм, а пористість близько 35%.

Адгезію електродного шару до мідного струмознімача оцінювали методом насічок з відривом клейкої стрічки. На поверхні електрода виконували сітку насічок із кроком 1 мм у зоні 10 × 10 мм, після чого приклеювали стандартну клейку стрічку та відривали під кутом 180°. Візуально оцінювали ступінь відшарування за п'ятибальною шкалою (0 - відшарування відсутнє; 5 - повне відшарування покриття). Для додаткової перевірки гнучкості зразки багаторазово згинали й контролювали появу тріщин.

Тестові комірки типорозміру CR2016 збирали в аргоновому боксі (H_2O та $\text{O}_2 < 0,1\text{ppm}$). Протиелектродом слугувала літєва фольга товщиною 400 мкм. Електроліт: 1M LiPF_6 у суміші етиленкарбонату та етилметилкарбонату (1:2). Сепаратор - мікропористий поліпропілен Celgard 2400. Об'єм електроліту - приблизно 150 мкл на комірку. Після герметизації комірки витримували 12 год для повного просочення.

Електрохімічне тестування виконували методом гальваностатичного циклування на тестовій системі Neware BTS-5V. Потенціальний діапазон 0,001-2,00 В відносно Li/Li^+ . Формувальні два цикли проводили при 0,05С, подальші - при 0,1С (оцінка стабільності).

Кулонівську ефективність визначали як відношення розрядної ємності до зарядної.

Результати та обговорення

Механічна цілісність композитних Si/C-анодів під час тривалого циклування значною мірою визначається адгезією зв'язуючого до струмознімача та його деформаційною стійкістю. Адгезію оцінювали методом насічок з відривом клейкої стрічки. Результати наведено в таблиці 1.

Найгірші показники зафіксовано для ПВДФ, оцінка становила 3 балів, що свідчить про слабе зчеплення з мідним колектором і низьку гнучкість плівки. Під час згинання електродного шару спостерігалось ламке відшарування, що відповідає відомим даним про недостатню взаємодію неполярних ланцюгів ПВДФ з гідрофільною поверхнею оксиду кремнію [4].

Композиційна система натрій-карбоксиметилцелюлоза / стирол-бутадієновий каучук (Na-КМЦ/СБК, 1:1) продемонструвала 1–2 бали: утворювався суцільний, еластичний шар без тріщин, здатний витримувати багаторазове згинання без руйнування. Це пояснюється синергією двох компонентів — жорсткої гідрофільної сітки КМЦ та пружного каучукового елементу СБК, які спільно забезпечують стабільність структури. Поліакрилова кислота (ПАК) показала 2–3 бали. Її висока густина карбокських груп сприяє формуванню водневих і йонних зв'язків із поверхнею SiO_x , однак надлишок жорстких ділянок полімерного ланцюга знижує еластичність плівки, тому зразки демонструють локальні відшарування по лініях насічок. Найкращі результати продемонстрував поліакрилат літію (ПААЛі). Дане полімерне зв'язуюче утворенню стабільних міжланцюгових зв'язків і “пластичному” поведінню полімерної

сітки. Така структура зберігає еластичність, забезпечуючи пружну адгезію до колектора навіть після багаторазового згинання електрода.

Таблиця 1. Оцінка адгезії електродів на основі графіту GZI-99 з 3% нанорозмірного кремнію та різними типами полімерного зв'язувального

Зв'язуюче	Оцінка (бали)	Характер поверхні після тесту
ПВДФ	4–5	Крихке відшарування під час згину
Na-КМЦ/СБК (1:1)	1–2	Суцільний шар без тріщин
ПАК	2–3	Локальні мікрвідшарування по насічках
ПААLi	0–1	Відсутність відшарувань, еластичний шар

Кореляція між адгезією та електрохімічною стабільністю була підтверджена результатами електрохімічними випробуваннями. Електрохімічні характеристики оцінювали за допомогою гальваностатичного зарядно-розрядного циклування у діапазоні потенціалів 0,001–2,00 В відносно літію. Перші два цикли виконували при струмі 0,05С (формувальні), далі — 100 циклів при 0,1С.

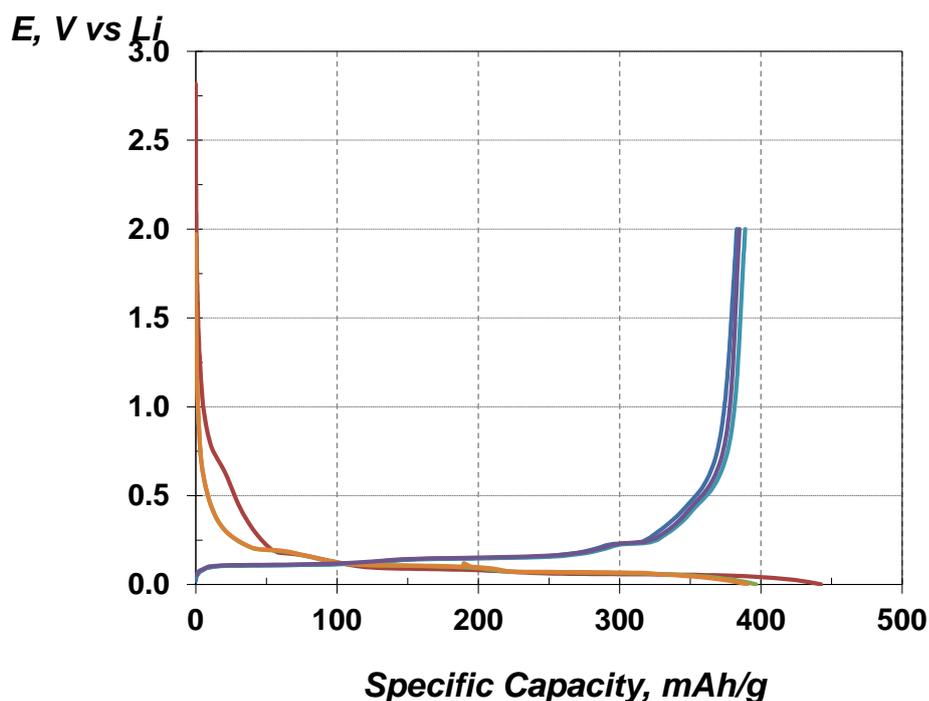


Рис. 1. Заряд і розряд лабораторного елемента з анодами на основі графіту, модифікованого матеріалами на основі кремнію.

Типова форма зарядно-розрядних кривих наведена на рис. 1 та 2. Для всіх зразків спостерігали характерні плато літіювання при 0,15–0,25 В та делітіювання при 0,45–0,55 В, що відповідає утворенню сполук типу Li_xSi та їх зворотному розкладу. У першому циклі помітна широка область незворотних реакцій у межах 1,0–0,5 В, пов'язана з формуванням поверхневого шару (SEI) на аноді. Для електродів з ПААLi та Na-КМЦ/СБК інтенсивність цієї ділянки була нижчою, що вказує на більш

стабільне утворення SEI. У наступних циклах криві набували стабільного вигляду без суттєвого зсуву потенціальних плато, що свідчить про збереження структури активного шару.

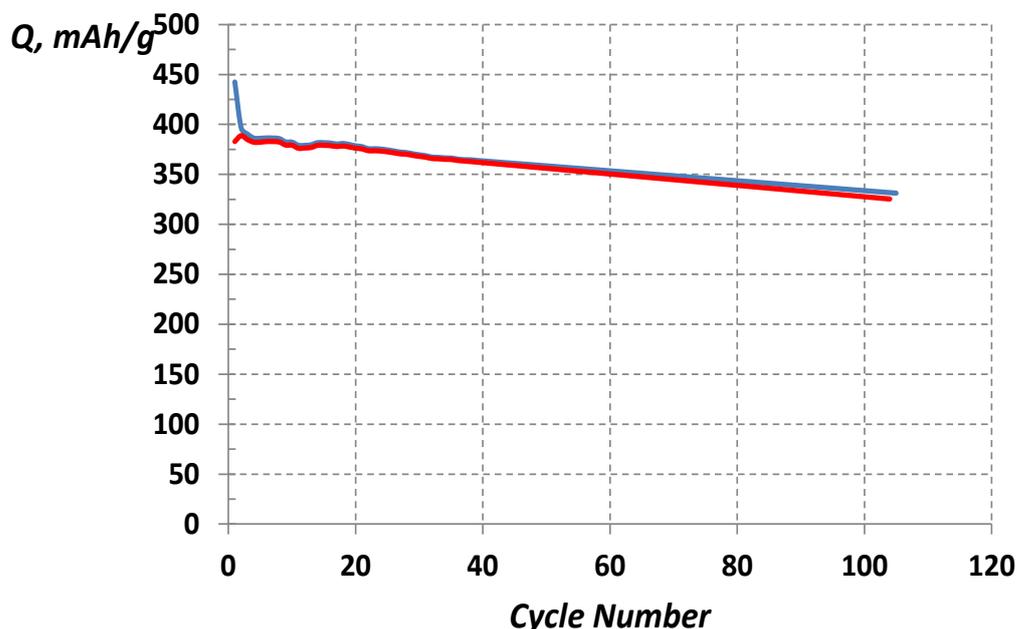


Рис. 2. Циклічна стабільність композитного анода на основі графіту з кремнієвим наноматеріалом

Залежність розрядної ємності від номера циклу (Таблиця 2) демонструє спільну тенденцію: після кількох перших формувальних циклів ємність зменшується та стабілізується на певному рівні. Для електрода з ПВДФ спостерігалось найшвидше падіння ємності — від початкового значення, а після 100 циклів залишалось лише 10–15 %. Електроди на основі Na-КМЦ/СБК зберігали близько 59–60 % ємності, а з ПАК 70–72 % після 100 циклів. Найвищу стабільність продемонстрував зразок із ПААLi, а саме приблизно 80 %.

Таблиця 2. Основні параметри гальваностатичного циклування.

Зв'язуюче	Ємність 2-го циклу, мА·год/г	Ємність 100-го циклу, мА·год/г	Кулонівська ефективність, %
ПВДФ	480 ± 20	50 ± 30	89
Na-КМЦ/СБК (1:1)	510 ± 15	310 ± 25	91
ПАК	550 ± 30	380 ± 20	80
ПААLi	520 ± 10	415 ± 15	85

Порівняння даних таблиць 1 і 2 демонструє чіткий зв'язок: чим краща адгезія зв'язуючого, тим вищою є стабільність циклування. Зв'язуючі з полярними функціональними групами (ПАК, Na-КМЦ/СБК, ПААLi) ефективніше стримують механічні руйнування електродного шару, зменшують втрату електричного контакту між частинками та перешкоджають повторному утворенню поверхневого шару. Зокрема,

перехід від ПВДФ до полярних водорозчинних систем ПАК і На-КМЦ/СБК підвищує термін служби анода. Зв'язуюче ПААЛі показало найкращий результат, утримуючи понад 80 % ємності після 100 циклів, що свідчить про високу механічну еластичність і стійкість до повторного розширення частинок Si.

Висновки. Полімерне зв'язуюче є ключовим чинником стабільності композитних Si/C-анодів, визначаючи їхню механічну цілісність і збереження електрохімічних властивостей під час циклування. У дослідженні показано, що заміна полівініліденфториду на полярні водорозчинні системи істотно підвищує адгезію, еластичність та довговічність електродів. Найкращі результати отримано для поліакрилату літію, який забезпечив до 80 % збереження ємності після 100 циклів і кулонівську ефективність понад 85 %. Особливо важливо, що як вуглецева основа використано вітчизняний графіт GZI-99, який продемонстрував високу стабільність структури та сумісність із кремнієм. Поєднання такого графіту з оптимізованим зв'язуючим створює наукове підґрунтя для розроблення конкурентоспроможних анодних матеріалів українського виробництва для літій-іонних акумуляторів нового покоління.

Подяка. Робота виконується за фінансовою підтримкою проекту ЄС 101103752 -GR4FITE «Стійке постачання графіту для анодів літій-іонних акумуляторів завдяки сталому розвитку європейського ланцюгу постачання» програми «Горизонт Європа».

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Son H.-J., Park S.-Y., Lee J.-M., Kim T.-Y., An E. Elastic cross-linked polymeric binder for high-performance silicon/graphite composite anodes in lithium-ion batteries. *J. Alloys Compd.* 2024. № 1010. P. 177724.
2. Yuca N., Taskin O. S., Guney E., García-Alonso J., Maestre D., Méndez B. Multifunctionalized conductive polymers for self-healing silicon anodes in lithium-ion batteries. *ACS Omega.* 2025. T. 10. C. 33607–33618.
3. Lee J., Park E., Lee D., Kang H. C., Chung J.-W., Shin I.-S., Kim H. Long-term performance of micro-silicon-based anodes in lithium-ion batteries enabled by mechanical reinforcement of aqueous binders. *Cell Reports Phys. Sci.* 2025. T. 6(10). C. 102896.
4. Nam J., Kim E., Rajeev K. K., Kim Y., Kim T.-H. Conductive self-healing polymeric binder using hydrogen bonding for Si anodes in lithium-ion batteries. *Sci. Reports.* 2020. T. 10. C. 14966.
5. Hwang J. H., Kim E., Lim E. Y., Lee W., Kim J.-O., Choi I., Kim Y. S., Kim D.-G., Lee J. H., Lee J.-C. Multifunctional interlocked binder with synergistic in situ covalent and hydrogen bonding for high-performance Si anode in lithium-ion batteries. *Adv. Sci.* 2023. T. 10(30). C. 2302144.
6. Hamzelui N., Linhorst M., Nyenhuis G. M., Haneke L., Eshetu G. G., Placke T., Winter M., Figgemeier E. Chitosan as enabling polymeric binder material for silicon-graphite-based anodes in lithium-ion batteries. *Energy Technol.* 2023. T. 11. C. 2201239.
7. Parikh P., Sina M., Banerjee A., Wang X., D'Souza M., Doux J.-M., Wu E., Trieu O., Gong Y., Zhou Q. et al. Role of polyacrylic acid (PAA) binder on the solid electrolyte interphase in silicon anodes. *Chem. Mater.* 2019. T. 31. C. 2535–2544.

8. Cao P.-F., Naguib M., Du Z., Stacy E., Li B., Hong T., Xing K., Voylov D., Li J., Wood D. Effect of binder architecture on the performance of silicon/graphite composite anodes for lithium-ion batteries. *ACS Appl. Mater. Interfaces*. 2018. T. 10. C. 3470–3478.
9. Zhao Y.-M., Wang Z., Wang L. Advances of polymer binders for silicon-based anodes in high energy density lithium-ion batteries. *InfoMat*. 2021. T. 3. C. 460–501.
10. Liu Y., Hou K., Li J., Lian C., Shang Y., Su H., Liu H. Dual-dynamic biomimetic binder for high-performance silicon anodes. *ACS Appl. Mater. Interfaces*. 2025. T. 17. C. 59444–59452.
11. Zuo X., Zhu J., Müller-Buschbaum P., Cheng Y.-J. Silicon based lithium-ion battery anodes: a chronicle perspective review. *Nano Energy*. 2017. T. 31. C. 113–143.
12. Choi S., Jung K.-N., Choi J. Design criteria for silicon-based anode binders in half and full cells. *Adv. Energy Mater.* 2022. T. 12(31). C. 2200850.
13. Magasinski A., Zdyrko B., Kovalenko I., Hertzberg B., Burtovyy R., Huebner C., Fuller T., Luzinov I., Yushin G. Toward efficient binders for Li-ion battery Si-based anodes: polyacrylic acid. *ACS Appl. Mater. Interfaces*. 2010. T. 2. C. 3004–3010.
14. Shkrob I. A., Zhang L., Zhang J., Liao C. Existence of optimal molecular weight for PAA binders in silicon/graphite composite anodes. *J. Power Sources*. 2018. T. 378. C. 671–676.
15. Sun F., Wheeler D. R. Effects of lithium ions and pH on the function of PAA binder for silicon anodes. *J. Electrochem. Soc.* 2023. T. 170. C. 080502.
16. Ui K., Kikuchi S., Mikami F., Kadoma Y., Kumagai N. Improvement of electrochemical characteristics of natural graphite negative electrode coated with PAA in pure propylene carbonate electrolyte. *J. Power Sources*. 2007. T. 173. C. 518–521.
17. Placke T., Kloepsch R., Dühnen S., Winter M. Role of electrolyte and SEI in high-performance silicon-based lithium-ion battery anodes. *J. Electrochem. Soc.* 2017. T. 164. C. A6184.
18. Eshetu G., Grugeon S., Mirvaux B., Reale P., Armand M. Advances and challenges in electrode–electrolyte interfaces for high-energy lithium-ion batteries. *Adv. Funct. Mater.* 2021. T. 31. C. 2008384.

2.10 ВЛАСТИВОСТІ ФІТОПЛІВОК ТА ФІТОГІДРОГЕЛІВ НА ОСНОВІ ПВС ТА ПОЛІСАХАРИДІВ

Швець В. В., Ляшок І. О., Бутенко О. О., Крюкова О. А.,
Андрусенко В. В., Лупина Д. О., Корінець В. В.

Київський національний університет технологій та дизайну, Україна
lyashok.io@knutd.edu.ua

*Фітоплівки, отримані методом поливу, та фітогідрогелі, отримані методом криоструктурування, на основі водних екстрактів ромашки лікарської *Matricaria chamomilla* та кропиви дводомної *Urtica dioica* було виготовлено з полівінілового спирту (ПВС) у композиції з полісахаридами: картопляним крохмалем (Кр) та карбоксиметилкрохмалем (КМК), ПВС/Кр та ПВС/КМК зі співвідношенні 1/1. Отримані зразки досліджено на сорбційні властивості до дії дистильованої води та фізіологічного розчину NaCl. Встановлено, що обидва типи фітогідрогелів мають просторово зшити структуру. Включення КМК до складу гідрогелів на основі кропиви дводомної *Urtica dioica* забезпечує збільшення ступеня набрякання до 300 % у фізіологічному розчині, підтверджуючи його потенціал як високогідрофільного модифікатора. У фітогідрогелях та фітоплівках на основі ромашки лікарської *Matricaria chamomilla*, навпаки, введення полісахаридів призводить до зниження сорбційної здатності у фізіологічному розчині NaCl порівняно з чистим ПВС. Загалом, для фітоплівок на основі кропиви дводомної *Urtica dioica* рекомендовано композиції ПВС/КМК для застосувань, що вимагають поглинання біологічних рідин до 200 %, а композиції ПВС та ПВС/Кр – для поглинання до 30 %.*

Ключові слова: *фітоплівки, фітогідрогелі, ступінь набрякання, водний екстракт ромашки лікарської *Matricaria chamomilla*, водний екстракт кропиви дводомної *Urtica dioica*.*

Гідрофільні полімерні плівки та гідрогелі є класом сучасних біосумісних матеріалів, які відіграють ключову роль у прискоренні регенеративних процесів шкіри. Їхня ефективність зумовлена багатофункціональним механізмом дії: ці матеріали активно зволожують шкірний покрив, ефективно абсорбують надлишковий ексудат, регулюють рівень вологості шляхом випаровування зайвої води та, найважливіше, формують на поверхні шкіри тонкий захисний бар'єр. Цей бар'єр критично важливий, оскільки він мінімізує трансепідермальну втрату вологи (ТЕВВ), що є обов'язковою умовою для підтримки оптимального вологого середовища, необхідного для прискорення та покращення процесу загоєння [1]. У медичній практиці знаходить широке застосування цілий спектр плівкових покриттів, виготовлених на основі різних полімерів, включаючи природні (наприклад, колаген) та синтетичні (зокрема, полівінілхлорид, поліетилен, поліпропілен та полівініловий спирт) [1].

Особливе місце серед цих матеріалів займає полівініловий спирт. Завдяки своїй винятковій хімічній універсальності, ПВС позиціонується як високопотенційний агент для різноманітних фармацевтичних, біомедичних та космецевтичних розробок. ПВС є водорозчинним та біосумісним полімером, що характеризується високими показниками адгезії та контрольованої здатності до набрякання. Ці властивості визначають його як матрицю для розробки складних систем доставки лікарських засобів та/або активних компонентів косметичного призначення. Шляхом точного маніпулювання властивостями полімерної системи або зміною технологічного процесу приготування, зокрема, варіюванням типу та концентрації зшиваючих агентів у структурі гідрогелю стає можливим прецизійне регулювання кінетики вивільнення інкорпорованих активних інгредієнтів, що синхронізується з контролем над процесом набрякання [2-4].

Більшість плівкових матеріалів, виготовлених на основі ПВС, демонструють цілком задовільні фізико-механічні характеристики та високу зручність у клінічному застосуванні. Однак, їхня природна газо- та вологопроникність не завжди повною мірою відповідає оптимальним вимогам, що висуваються до ідеальних пов'язок для шкіри. Для вирішення цієї технологічної проблеми у структурі плівкових покриттів створюються спеціальні мікроскопічні отвори (перфорації), які є проникними для газів, але залишаються непроникними для мікроорганізмів, забезпечуючи тим самим ефективно відведення надлишкової вологи з поверхні рани. Додатковою перевагою таких пов'язок є їхня прозорість, що дозволяє здійснювати безперервний візуальний моніторинг процесу загоєння без необхідності зняття пов'язки. З метою надання матеріалу специфічних лікувальних властивостей активні фармацевтичні інгредієнти або інші терапевтичні агенти інкорпорується безпосередньо у полімерну матрицю [5]. В якості перспективної альтернативи синтетичним лікарським засобам розглядається використання стандартизованих рослинних екстрактів, які, як правило, характеризуються нижчим рівнем токсичності та меншою кількістю побічних ефектів [6, 7].

В межах даного дослідження для формування плівкових покриттів та гідрогелевих систем була обрана біологічно активна основа – водні екстракти ромашки лікарської *Matricaria chamomilla* та листя кропиви дводомної *Urtica dioica*.

Цей вибір обґрунтований широким спектром терапевтичної дії, притаманним ромашці, що включає потужні протизапальний, заспокійливий, кровоспинний та знеболювальний ефекти. Крім того, ромашка лікарська *Matricaria chamomilla* демонструє виражену антигістамінну та противірусну активність, сприяє зняттю спазмів гладкої мускулатури, значно прискорює регенерацію епітеліальних тканин та інгібує процеси гниття і бродіння, що є особливо цінним при лікуванні ран та шкірних уражень.

Висока терапевтична ефективність ромашки лікарської *Matricaria chamomilla* обумовлена складним і багатим хімічним складом її суцвіть. Суцвіття містять від 0,2 до 0,8 % ефірної олії, у складі якої ідентифіковано

важливі сесквітерпенові вуглеводи та спирти, зокрема бізоболол, бізобололоксид та кетоспирт. Серед інших ключових компонентів виділяють сесквітерпенові лактони матрицин і матрикарин, які відомі своїми протизапальними властивостями. Крім того, хімічний профіль включає значну кількість флавоноїдів (відповідальних за антиоксидантну дію), кумаринів, ситостерину, холіну, полісахаридів та каротину. Органічні кислоти, такі як аскорбінова, ізовалер'янова та каприлова, також присутні у складі та доповнюють загальний терапевтичний потенціал екстракту [8]. Таким чином, інкорпорація водного екстракту ромашки лікарської *Matricaria chamomilla* дозволяє створити функціоналізовані полімерні матриці з вираженими лікувальними та регенеративними властивостями.

Кропива дводомна *Urtica dioica* є високоцінним фітотерапевтичним засобом, який традиційно рекомендується для використання в клінічній практиці з метою зупинки різного роду кровотеч. Зокрема, ця рослина сировина ефективно застосовується при лікуванні маткових, гемороїдальних, легеневих та кишкових кровотеч. Завдяки своїм підтвердженим фармакологічним властивостям, сухий екстракт кропиви дводомної *Urtica dioica* активно включається до складу сучасних лікарських препаратів. Ці препарати знаходять застосування у терапії гострих та хронічних запальних процесів печінки, а також використовуються при лікуванні хронічних запорів, запалення жовчних шляхів та жовчнокам'яної хвороби, демонструючи комплексний вплив на гепатобіліарну та травну системи.

Препарати, виготовлені на основі кропиви дводомної *Urtica dioica*, традиційно застосовуються як потужний гемостатичний засіб. Механізм їхньої дії пов'язаний зі стимуляцією скорочувальної діяльності міометрію, що є критично важливим для зупинки післяпологових або дисфункціональних маткових кровотеч. Крім того, ці препарати підвищують показники зсідання крові. Висока ефективність препаратів кропиви дводомної *Urtica dioica* відзначена також при лікуванні кровотеч клімактеричного, гемороїдального та інших етіологічних типів, що підкреслює їхню клінічну універсальність як засобу для контролю геморагічних синдромів.

Створення та розширення асортименту інноваційних плівкових і гідрогелевих матеріалів медичного та косметологічного призначення є нагальною науково-практичною задачею сучасного біоматеріалознавства. Ключовим напрямком у цій сфері є розробка композицій на основі біосумісних полімерів, функціоналізованих шляхом додавання природних фітокомпонентів, які забезпечують додаткові терапевтичні властивості.

Особливий науковий та практичний інтерес у контексті створення пролонгованих систем доставки активних інгредієнтів у полімерних матрицях становлять полісахариди, які можуть виступати як допоміжні компоненти (пролонгатори дії). Серед них виділяються крохмаль та його похідна – карбоксиметилкрохмаль. Ці полісахариди здатні впливати на структурні та функціональні характеристики кінцевого матеріалу, модулюючи швидкість вивільнення інкорпорованих речовин.

В роботі розглянуто можливість створення на основі водних екстрактів ромашки лікарської та кропиви дводомної фітоплівок та фітогідрогелів полівінілового спирту у композиції з полісахаридами: картопляним крохмалем (ПВС/Кр) та карбоксиметилкрохмалем (ПВС/КМК) зі співвідношенні 1/1. Як основу гідрогелевих матеріалів використано ПВС марки 16/1, масова частка ацетатних груп не більше 0,9–1,7 %, Кр ДСТУ 4286:2004 та КМК CAS: 9063-38-1. Для створення основи розчинів ПВС, Кр та КМК виготовлено водний екстракт ромашки лікарської та кропиви дводомної за рецептурою: 100 г сухої сировини квітів ромашки лікарської або листя кропиви дводомної на 1 л дистильованої води. Проводилося екстракція на водяній бані 15 хв при температурі 95 °С, а потім охолодження протягом 45 хв при кімнатній температурі. Після чого здійснювалося проціджування з наступною фільтрацією через складчастий фільтр для виключення частин рослин в водному екстракті. На основі цих екстрактів було виготовлено на водяній бані 10 % розчини ПВС (40 хв), 10% розчини Кр (10 хв) і при кімнатній температурі 5 % розчини КМК (15 хв) та змішування у співвідношенні 1/1 композиції ПВС/Кр та ПВС/КМК.

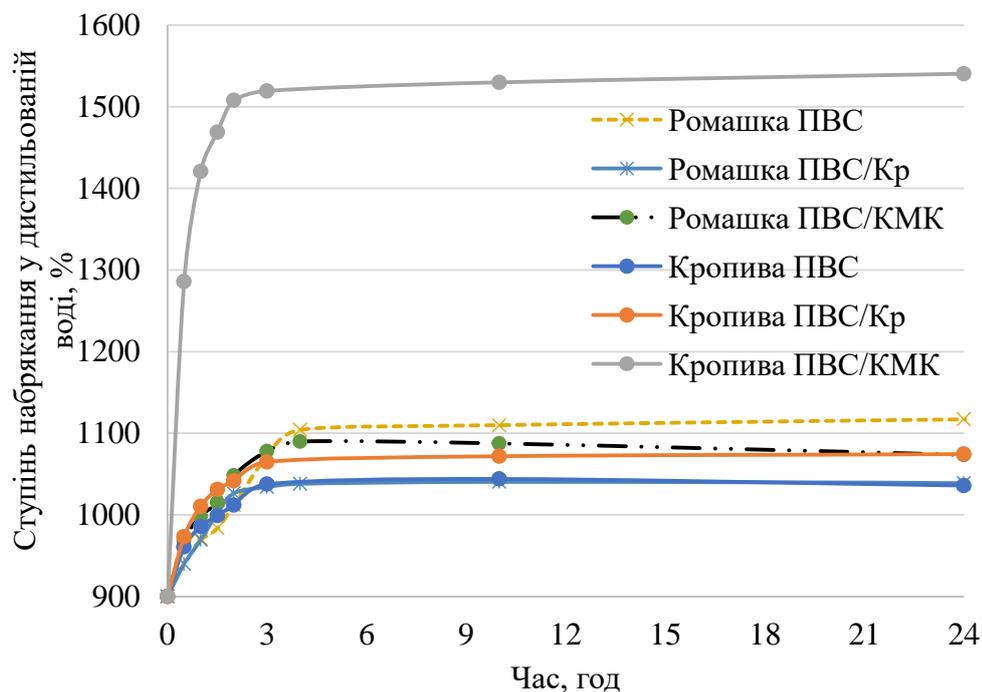
Фітогідрогелі отримано методом кріоструктурування композицій ПВС, ПВС/Кр та ПВС/КМК при температурі – 15 °С протягом 24 годин з наступним поступовим розморожуванням при кімнатній температурі. При цьому кріоструктурування ПВС відбувається при заморожуванні, а Кр і КМК – при розморожуванні [9, 10]. Плівки отримано методом поливу та висушуванням при кімнатній температурі протягом 48 годин.

З метою системного вивчення впливу хімічної природи полісахаридів на експлуатаційні характеристики композитних матеріалів, у даній роботі було проведено детальний аналіз сорбційних властивостей фітоплівок та фітогідрогелів. Досліджуваними системами були біокомпозити на основі ПВС, до складу яких було включено екстракти ромашки лікарської *Matricaria chamomilla* та кропиви дводомної *Urtica dioica*, з подальшим додаванням одного з полісахаридів: ПВС/Кр або ПВС/КМК.

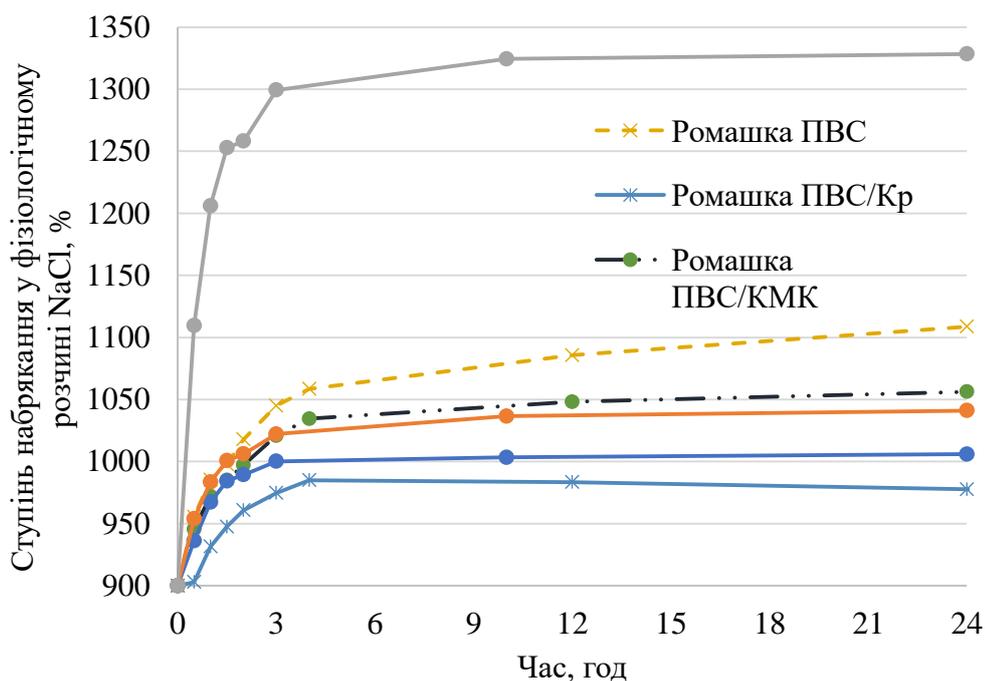
Для оцінки функціональності цих матеріалів було досліджено кінетику їхнього набрякання. Тестування проводилося у двох фізіологічно релевантних середовищах: дистильованій воді та фізіологічному розчині NaCl (0,9 % розчин). Моніторинг процесу набрякання здійснювався протягом тривалого періоду, який становив 72 години, що дозволяє достовірно оцінити як початкову швидкість сорбції, так і досягнення рівноважного стану гідратації матеріалів. Отримані результати критично важливі для розуміння потенційної поведінки цих біокомпозитів *in vivo* при контакті з біологічними рідинами.

Аналіз сорбційних властивостей фітогідрогелів у дистильованій воді (Рис. 1, а) виявив значні відмінності між досліджуваними композиціями. Для контрольних зразків фітогідрогелів ПВС на основі екстракту ромашки лікарської *Matricaria chamomilla* встановлення рівноважного значення ступеня набрякання відбувається порівняно швидко – після 8 годин експозиції. Така швидка стабілізація свідчить про успішне формування

просторово зшитій полімерній сітці під час кріоструктурування, що ефективно обмежує надмірне набухання матеріалу.



а



б

Рис. 1. Залежність ступеня набрякання фітогідрогелів ПВС, ПВС/Кр та ПВС/КМК на основі екстракту ромашки лікарської *Matricaria chamomilla* та кропиви дводомної *Urtica dioica* у дистильованій воді (а) та у фізіологічному розчині NaCl (б).

На відміну від контрольних зразків, композити, що містять додаткові полісахариди, а саме ПВС/Кр та ПВС/КМК, демонструють іншу кінетику. Для цих зразків максимальний показник ступеня набрякання також досягається через 8 годин перебування у водному середовищі. Однак, після

досягнення максимуму спостерігається подальше поступове зниження ступеня набрякання. Через 48 годин цей показник зменшується відносно максимального значення на 32 % для зразків ПВС/Кр та на 41 % для ПВС/КМК до встановлення їхніх рівноважних значень. Ймовірно, зниження ступеня набрякання, яке фіксується вже після 24 годин перебування у дистильованій воді, асоційоване з процесом вивільнення інкорпорованого екстракту ромашки лікарської *Matricaria chamomilla* з полімерної матриці. Цей процес візуально підтверджується появою характерного забарвлення у навколишньому розчині, при цьому цілісність макроструктури самого фітогідрогелю залишається збереженою.

Криві сорбції, отримані при дослідженні набрякання у фізіологічному розчині NaCl (Рис. 1, б), також виявили варіативність у часі досягнення рівноваги. Для зразків ПВС на основі екстракту ромашки лікарської *Matricaria chamomilla* максимальний і рівноважний ступінь набрякання (який становив значні 1120 %) встановлюється після 48 годин. Для зразків ПВС/КМК рівноважний ступінь набрякання 1056 % досягається значно раніше – після 24 годин.

Зразки фітогідрогелів ПВС/Кр демонструють найшвидше досягнення максимального ступеня набрякання 984 % вже через 4 години після початку контакту з фізіологічним розчином NaCl. Проте, аналогічно до поведінки у дистильованій воді, після досягнення піку протягом наступних 44 годин ступінь набрякання істотно знижується – приблизно на 20 %. Ця пост-максимальна дегідратація та зменшення об'єму матеріалу, ймовірно, також пов'язана з вивільненням екстракту ромашки лікарської *Matricaria chamomilla* в навколишній сольовий розчин.

Результати досліджень сорбційних властивостей фітогідрогелів на основі ПВС з водним екстрактом кропиви дводомної *Urtica dioica* однозначно демонструють, що додавання полісахаридних модифікаторів суттєво впливає на їхню гідрофільність. У дистильованій воді контрольний ПВС набухає на 1038 %, тоді як додавання крохмалю забезпечує лише незначне зростання ступеня набрякання до 1065 % (збільшення на 27 %). Натомість, додавання до фітогідрогелю КМК призводить до кардинального покращення сорбційної здатності – до 1519 %, що є збільшенням на 481 %. Аналогічна, хоча й менш виражена, тенденція спостерігається і у фізіологічному розчині NaCl: ПВС/Кр набухає на 1022 %, а ПВС/КМК – на 1300 %. Таким чином, для отримання фітогідрогелів на основі екстракту кропиви дводомної *Urtica dioica* з максимально високими сорбційними властивостями для потенційного використання як пов'язок для ексудативних ран доцільно використовувати композицію ПВС/КМК.

Дослідження сорбційних властивостей фітоплівків на основі ПВС на основі екстракту ромашки лікарської *Matricaria chamomilla* виявило значну залежність їхньої гідратації від типу полісахаридної добавки та навколишнього середовища. Зокрема, для зразків ПВС/КМК максимальний ступінь набрякання у фізіологічному розчині NaCl фіксується на рівні 120 %, з подальшим встановленням рівноважного значення 110 %.

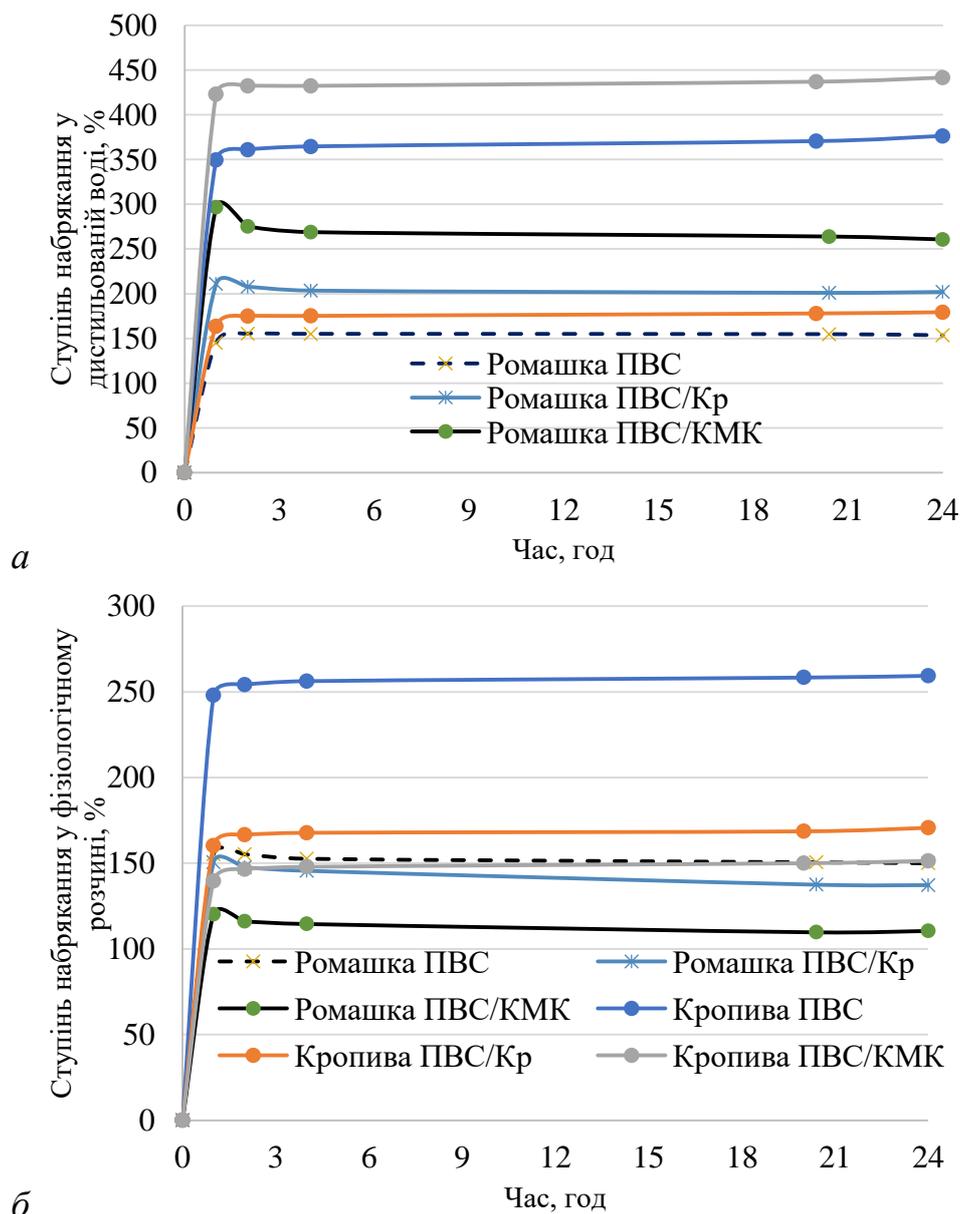


Рис. 2. Залежність ступеня набрякання фітоплівок ПВС, ПВС/Кр та ПВС/КМК на основі екстракту ромашки лікарської *Matricaria chamomilla* та кропиви дводомної *Urtica dioica* у дистильованій воді (а) та у фізіологічному розчині NaCl (б).

Ці показники значно нижчі, ніж при набряканні у дистильованій воді, де максимальний ступінь досягає 300 %, а рівноважний — 260 %. Характерною особливістю для плівок, що містять як Кр, так і КМК, є наявність піку сорбції на кривих гідратації приблизно через 1 годину експозиції, після чого відбувається його спад на другій годині дослідження. Ця початкова десорбція, ймовірно, пов'язана з вивільненням частини інкорпорованого екстракту ромашки лікарської *Matricaria chamomilla* з полімерної матриці, що візуально підтверджується зміною забарвлення навколишнього розчину при збереженні структурної цілісності плівок.

При порівнянні сорбційних кривих встановлено, що у дистильованій воді ступінь набрякання зростає у послідовності ПВС, ПВС/Кр, ПВС/КМК,

що свідчить про позитивний вплив полісахаридів на гідрофільність у гіпотонічному середовищі. Водночас, у фізіологічному розчині спостерігається протилежний порядок зростання: ПВС/КМК, ПВС/Кр, ПВС. Отже, можна зробити висновок, що наявність у складі плівок ПВС на основі екстракту ромашки лікарської *Matricaria chamomilla* полісахаридів Кр та КМК збільшує ступінь набрякання у дистильованій воді, проте знижує його у фізіологічному розчині через вплив іонів солі на іоногенні групи полісахаридів.

Дослідження сорбційних кривих для всіх фітоплівок показало їхній характерний вигляд, типовий для кристалічних полімерних матеріалів. Зокрема, для плівок на основі ПВС з водним екстрактом кропиви дводомної *Urtica dioica* встановлено, що включення полісахаридних модифікаторів суттєво впливає на їхню гідрофільність. Додавання Кр призводить до збільшення максимального значення сорбції дистильованої води на 27 %, тоді як використання КМК викликає значне зростання цього показника на вражаючі 420 %. Схожа закономірність спостерігалася і при аналізі максимальної сорбції у фізіологічному розчині NaCl: крохмаль збільшує сорбцію на 35 %, а КМК – на 294 %.

Загалом, всі фітоплівки демонструють знижену сорбцію у фізіологічному розчині порівняно з дистильованою водою: чистий ПВС — на 32 % менше, ПВС/Кр — на 24 % менше, тоді як ПВС/КМК демонструє найбільшу відносну різницю — на 208 % менше. У кількісному вираженні крохмаль підвищує набрякання плівок у NaCl та дистильованій воді приблизно однаково, у 1,03 рази, тоді як КМК збільшує набрякання у дистильованій воді у 1,45 рази, а у фізіологічному розчині NaCl – у 1,3 рази.

Відповідно до сорбційної здатності, фітоплівки з додаванням КМК можуть бути рекомендовані для застосування в умовах, що вимагають високого поглинання біологічних рідин (до 200 % від власної ваги), тоді як фітоплівки ПВС та ПВС/Кр найбільш придатні для використання у випадках, де необхідне поглинання лише невеликої кількості ексудату (до 30 %).

Висновки. Обидва типи фітогідрогелів з ромашкою лікарською *Matricaria chamomilla* та кропивою дводомною *Urtica dioica* на основі ПВС підтвердили наявність просторово зшитої структури після кріоструктурування. Додавання полісахаридів, особливо КМК, призводить до значної модуляції сорбційних властивостей матеріалів. У випадку фітогідрогелів на основі кропиви дводомної *Urtica dioica*, КМК збільшує ступінь набрякання на 300 % у порівнянні з чистим ПВС. Це свідчить про універсальний потенціал КМК як потужного гідрофільного модифікатора. Для фітоплівок на основі кропиви дводомної *Urtica dioica* встановлена чітка кореляція між складом і функціональним призначенням. Фітолівки з високим вмістом КМК рекомендуються для використання в умовах, що вимагають значного поглинання біологічних рідин.

Фітоплівки ПВС та ПВС/Кр рекомендуються для випадків, де необхідне поглинання невеликої кількості ексудату. Разом з цим, хоча КМК є потужним модифікатором в обох системах, його вплив на загальну сорбцію

фітогідрогелів та фітоплівок з ромашкою лікарською *Matricaria chamomilla* у фізіологічному розчині NaCl протилежний - він призводить до зниження сорбційної здатності, тоді як у фітогідрогелях з кропивою дводомною *Urtica dioica* спостерігається значне збільшення.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Криховець, О.В.; Слободяник, В.Г. Дослідження плівок на основі полівінілового спирту як екологічного гнучкого пакування. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, 2023. – 2. – С. 15-20. http://nbuv.gov.ua/UJRN/vvpi_2023_2_4
2. Popescu, M.C. Structure and sorption properties of CNC reinforced PVA films. *International journal of biological macromolecules*, 2017. – 101. – P. 783-790. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2017.03.168>
3. Jiang, S.; Liu, S.; Feng, W. PVA hydrogel properties for biomedical application. *Journal of the mechanical behavior of biomedical materials*, 2011. – 4(7). – P. 1228-1233. <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2011.04.005>
4. Kamoun, E.A.; Kenawy, E.R.; Chen, X.A. Review on polymeric hydrogel membranes for wound dressing applications: PVA-based hydrogel dressings. *Journal of advanced research*, 2017. – 8(3). – P. 217-233. <https://doi.org/10.1016/j.jare.2017.01.005>
5. Купріянова, О.М.; Хохленкова, Н.В.; Ярких Т.Г. Вивчення актуальності розробки нових перев'язувальних засобів з використанням сировини природного походження. *Запорозький медичний журнал*, 2011. – 13(4). – С. 114-115.
6. Суберляк, С.А.; Петріна, Р.О.; Гриценко, О.М.; Федорова, О.В. Антимікробна активність гідрогелевих матеріалів на основі кополімерів полівінілпіролідону в комплексі з екстрактами *Calendula Officinalis* і *Arnica Montana*. *Chemistry, Tehnology and Application of Substances*, 2020. – 3(1). – P.135-141. <https://doi.org/10.23939/ctas2020.01.135>
7. Нікітіна, О.О.; Робак, А.Ю.; Циба, Д.С. Інноваційні підходи до використання лікарських рослин у сучасній фармацевтиці. *Технології та інжиніринг*, 2024. – 3(20). – С. 110-126. <https://doi.org/10.30857/2786-5371.2024.3.9>
8. Mustafakulovna, M.M.; Kurbonaliyeva, S.M. Pharmacological action of the components of chamomile pharmacy and its use in cosmetics. *World Bulletin of Public Health*, 2022. – 17. – P. 90-93.: <https://www.scholarexpress.net>
9. Ляшок І.О., Крюкова О.А., Кичужинець М.С., Швець В.В., Галаган В.В., Стаднік Д.В. Фізичні властивості гідрогелів та плівок пвс на основі водного екстракту кропиви дводомної. *Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки*. – 2024. – №5. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2024-343-6-61>
10. Ляшок І.О., Плаван В.П., Крюкова О.А., Полушкін М.М., Швець В.В., Шаповалова Я.С. Вплив полісахаридів на фізичні властивості плівок та гідрогелів ПВС на основі водного екстракту ромашки лікарської (*Matricaria Chamomilla*) // *Вісник КНУТД. Технології та інжиніринг* №5(22), 2024, с.101-109. <https://doi.org/10.30857/2786-5371.2024.5.10>

2.11 МОРФОЛОГІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ НЕТКАНИХ ВОЛОКНИСТИХ МАТЕРІАЛІВ ОДЕРЖАНИХ МЕТОДОМ ЕЛЕКТРОФОРМУВАННЯ

Сікора А. С., Ляшок І. О., Бутенко О. О., Крюкова О. А.,
Барков Д. Д., Ковальський В. М.

Київський національний університет технологій та дизайну, Україна
lyashok.io@knuud.edu.ua

Неткані волокнисті матеріали, отримані методом електроформування, відзначаються унікальною морфологією завдяки нанорозмірним діаметрам волокон і високій питомій поверхні. У статті узагальнено дані щодо впливу параметрів процесу (напруги, швидкості потоку, діаметру голки, відстані до колектора), складу полімерних сумішей (в'язкості, молекулярної маси, концентрації, типу розчинника, провідності, поверхневого натягу) та умов навколишнього середовища (температури, вологості) на морфологію та розміри волокон. Показано, що контроль цих факторів дозволяє цілеспрямовано регулювати діаметр волокон і структуру матів. Для оцінки морфології використовують високоточні методи, зокрема SEM, TEM, AFM та FTIR. Порівняння з традиційними тканими матеріалами свідчить, що електроформовані волокна мають вищу пористість, покращену паро- та повітропроникність, а механічні властивості залежать від орієнтації та щільності волокон. Такі характеристики роблять ці матеріали перспективними для фільтрів, медичних перев'язувальних засобів, мембран та сорбентів.

Ключові слова: *електроформування, неткані матеріали, ультратонкі матеріали, морфологія волокон ультратонких нетканних матеріалів.*

Неткані волокнисті матеріали — це відомий тип текстильних матеріалів, що одержуються без використання традиційних методів прядіння, ткацтва чи в'язання. Виготовлення таких матеріалів не потребує етапу перетворення волокон на пряжу; як сировину застосовують волокна довжиною 50–60 мм, отримані переважно шляхом шпателювання неперервного пучка волокон. Часто це відходи текстильних виробництв або волокна, одержані шляхом вторинної переробки [1]. У порівнянні з тканими матеріалами неткані мають низку недоліків, зокрема нижчу міцність і зносостійкість. Водночас їх перевагами є вища пористість, менша густина та краща паропроникність. Такі матеріали особливо придатні для виробництва фільтраційних, медичних і одноразових виробів. Основні методи одержання нетканних волокнистих матеріалів включають: механічні (кардочесання, аеро-й голкопробивання, водоструминне скріплення), фізико-хімічні (осадження з суспензій або розчинів), термоскріплення (зв'язування волокон

розплавленням термопластичних компонентів), хімічне скріплення (використання клеїв або зшивачів) та електроформування (створення ультратонких волокон із розчинів або розплавів під дією електричного поля).

Особливу увагу дослідників привертає метод електроформування. Це відомий і технологічно доступний спосіб отримання нетканих волокнистих матеріалів, у яких діаметр структурних елементів може бути меншим за 100 нм. в залежності від параметрів процесу. Принцип методу ґрунтується на дії електричного поля високої напруги на полімерний розчин або розплав, унаслідок чого формується тонкий струмінь, що витягується, твердне й осаджується на заземлений колектор у вигляді волокнистого шару. Такий волокнистий шар є нетканим матом із хаотично переплетених між собою волокон типовий діаметр яких складає від кількох десятків нанометрів до кількох мікрон. Волокна, отримані в результаті процесу електроформування, можуть мати практично необмежену довжину, так при формуванні розчину полікапролактону із збором волокон на дві паралельні пластини, було одержано волокна із середнім діаметром від 0,35 до 1 мкм, та довжиною до 35-50см [2], у якості гіпотези автор зазначає, що у разі збільшення розміру пластин можуть бути одержані волокна більшої довжини. Питома поверхня нетканих електроформованих матів, за рахунок нанорозмірного діаметру волокон, на кілька порядків вища ніж у традиційних волокнистих або тканих матеріалів, типово це 10-200 м²/г проти 0,1-1 м²/г. На практиці це забезпечує високу паро- та повітропроникність, гарну змочуваність, швидкий масо- й теплообмін, що робить такі матеріали придатними для використання як високоефективні фільтри. Крім того, можливість введення функціональних добавок до складу полімерних сумішей робить їх перспективними для застосування у медичних перев'язувальних засобах, мембранах і сорбентах.

За умови підбору параметрів процесу, метод електроформування дає змогу отримувати вироби з контрольованою морфологією. Залежно від складу полімеру й умов процесу можна цілеспрямовано регулювати діаметр і структуру волокон, що робить метод електроформування універсальним для створення функціональних наноматеріалів. На процес електроформування впливає кілька факторів, які можна розділити на: параметри пристрою, рецептури та навколишнього середовища [3].

До параметрів пристрою відносять: напругу, швидкість потоку, діаметр голки та відстань від голки до колектора.

Як правило зі збільшенням напруги діаметр волокон зменшується в результаті посилення сил відштовхування, що в свою чергу викликають розтягування волокон [3]. Так при формуванні розчину полі(3-гідроксибутират-ко-3-гідроксивалерат) (PHBV) у хлороформі було визначено, що середній діаметр волокон зменшився з 2 до 1 мкм при збільшенні прикладеної напруги з 9 до 20 кВ, автори зазначають, що зі збільшенням напруги – звужувався розподіл діаметрів волокон, а також, що морфологія «кулька на нитці» має тенденцію до пригнічення при вищих напругах.. [4]. Однак результати формування полікапролактону (PCL) розчиненого у суміші хлороформу та метанолу у співвідношенні 3:1

продемонстрували збільшення середнього діаметру волокон при збільшенні напруги з 15 до 20 кВ [5]. Такий ефект автори пояснюють скороченням часу польоту (дрейфу) волокон до колектора, також відмінним був вплив збільшення напруги на розподіл діаметрів волокон, а саме, спостерігалось розширення кривої розподілу, проте, не зважаючи на зміну напруги, не було помічено формування «кульок».

Ефективне управління швидкістю потоку є важливим для підтримки стабільного конусу Тейлора та забезпечення достатнього часу для випаровування розчинника [3]. Якщо швидкість потоку занизька, то заряджений струмінь буде нестабільним, що призводитиме до збільшення розподілу діаметрів та обриву ниток, а якщо вище необхідної – до збільшення діаметра волокон та утворення дефектів. Ці твердження підтверджують результати досліджень [4] де збільшення швидкості потоку з 0,5 до 5 мл/год призвело до збільшення середнього діаметра з 2 до 4,6 мкм.

Вплив діаметру голки напругу пов'язаний із контролем швидкості потоку, більший діаметр голки зазвичай сприяє збільшенню швидкості потоку, що у результаті призводить до збільшення діаметру волокон і навпаки при зменшенні діаметру голки швидкість потоку обмежується, що дає можливість одержати тонші волокна. В ході експериментів із формуванням розчину поліетиленоксиду (PEO) у суміші етанол-вода у співвідношенні 1:3, особливу увагу було приділено впливу характеристик голки на процес формування та морфологію зразків [6]. Автори звернули увагу на те, як впливають діаметр голки та швидкість потоку на швидкість зсуву, що в сою чергу має вплив на в'язкість полімерного розчину. Автори зазначають, що вища швидкість зсуву призводить до зниження в'язкості, що викликане орієнтацією ланцюгів в потоці, так при постійній швидкості потоку для голок меншого діаметру в'язкість розчинів була мінімальною, а швидкість зсуву максимальною, що дозволило отримати волокна з найменшим середнім діаметром.

Відстань від голки до колектора визначає час дрейфу, волокон, що має бути таким, щоб забезпечити випаровування розчинника, але не спричинити послаблення електричного поля. Зазвичай збільшення відстані призводить до утворення тонших волокон, а коли відстань занадто мала розтягування струменя стає обмеженим, що призводить до утворення волокон більшого діаметру та появи дефектів [7, 8]. Якщо ж відстань від голки до колектора занадто велика, спостерігається утворення пучків волокон у формі кульок, що переважно є небажаним дефектом.

До параметрів рецептури відносять: в'язкість, молекулярну масу, концентрацію, розчинник, провідність та поверхневий натяг.

В'язкість, молекулярна маса та концентрація є пов'язаними між собою параметрами. Є типовим, що при формуванні вища молекулярна маса або концентрація призводить до отримання товстіших волокон. Вища молекулярна маса, або концентрація часто призводить до збільшення в'язкості, що перешкоджає витягуванню полімерного струменя. Так наприклад при формуванні розчину нейлону 6 в мурашиній кислоті було

помічено, що при зменшенні концентрації розчину, середній діаметр волокон у зразках різко зменшувався, при концентрації полімеру в 15% спостерігались волокна діаметром 250-700 нм, а для концентрацій 20% та 25% - 750-1200 нм та 750-1500 нм відповідно[7]. Однак автори також зазначають, що зі збільшенням концентрації зменшувалась кількість дефектів типу «кулька на нитці» та їх розмір, автори пояснюють це тим, що при інших сталих параметрах розчини з низькою концентрацією досягають колектора до повного випаровування розчинника. В'язкість полімерного розчину чи розплаву описує переплетення полімерних ланцюгів, якщо в'язкість нижче критичної це як правило призводить до обриву струменя, оскільки краплі мають низький поверхневий натяг та низький опір електричному полю, таке явище називають нестабільністю Релея.

Ідеальний розчинник повинен відповідати кільком вимогам: добре розчиняти полімер, підтримувати в'язкість розчину та поверхневий натяг, а також мати помірну леткість, щоб забезпечувати випаровування під час процесу. Вплив розчинника на однорідність волокон та їх розподілення, а також на механічні властивості нановолокон розглянули в ході досліджень електроформування PCL розчиненого в хлороформі, ацетоні та оцтовій кислоті [9]. Результати досліджень продемонстрували, що найкращі механічні властивості були притаманними зразкам, що отримані з розчину PCL в хлороформі, де середній модуль пружності становив 6,53 МПа, найнижчий результат показали зразки із розчину PCL в оцтовій кислоті – 2,92 МПа. Цікаво, те, що значення модуля пружності PCL в хлороформі відповідало значенню тканин стінок печінки та нирок, PCL в ацетоні – рогівки ока, а PCL в оцтовій кислоті – артерій, вен, спинного мозку та тканин сірої речовини. Відрізнялась також морфологія зразків, так зразок PCL в хлороформі мав однорідну поверхню, на противагу зразкам PCL в оцтовій кислоті та PCL в ацетоні.

Провідність полімерного розчину впливає на розтягування та видовження струменя, що у свою чергу впливає на розміри та морфологію волокон. Електричне поле в процесі електроформування викликає накопичення зарядів на поверхні полімерного розчину чи розплаву. Низька провідність може призводити до нерівномірного формування конусу Тейлора, обриву струменя, що викликає появу дефектів на поверхні зразків та неоднорідність волокон. З метою покращення провідності в розчині полімеру можуть вноситись добавки, наприклад солі чи металеві наночастинки, крім того покращити провідність розчину можна шляхом зміни розчинника чи використання сумішей розчинників.

Поверхневий натяг відіграє важливу роль в процесі електроформування, високий поверхневий натяг вимагає посилення електричного поля, внаслідок чого струмінь стає нестабільним, що призводить до збільшення діаметру волокон, і навпаки нижчий поверхневий натяг має сприятливий вплив на формування конусу Тейлора, тим самим підвищує стабільність струменя та сприятливо впливає на однорідність волокон.

До параметрів навколишнього середовища відносять температуру та вологість.

Підвищення температури навколишнього середовища прискорює випаровування розчинника та знижує в'язкість розчину, як правило це позитивно впливає на процес формування та однорідність волокон зразка, одна надмірно високі температури викликають нестабільність струменя, закупорення голки, що навпаки погіршує якість зразків. Взаємозв'язок між температурою навколишнього середовища, поверхневим натягом та в'язкістю продемонстрували в ході електроформування розчинів PVDF, так при температурі в 5 °С, максимальній в'язкості та поверхневому натягу, формування волокон фактично не відбувалось, тоді як зі збільшенням температури до 15-35 °С, без зміни інших параметрів, були одержані зразки, однорідність котрих покращувалась, а кількість дефектів зменшувалась із ростом температури [10]. Однак коли температура збільшилась до 45 °С на поверхні зразків знову спостерігались невеликі кульки в місцях перетину волокон.

Вплив вологості виражається по різному для гідрофобних та гідрофільних полімерів. Так у випадку з гідрофобними полімерами, при високій гідрофобності спостерігається раннє затвердіння, що призводить до збільшення середнього діаметру волокон та пригніченню дефектів типу «намистина на нитці». Для гідрофільних полімерів підвищена вологість навпаки розріджує струмінь як результат поглинання надмірної вологи включно до появи нестабільності струменя.

З огляду на розмір структурних одиниць, оцінка морфологічних властивостей зразків нетканих волокнистих матеріалів одержаних методом електроформування вимагає використання високоточних методів аналізу, оскільки звичні способи, такі як оптична мікроскопія чи фотографічні методи спостереження, не можуть надати повноцінного уявлення про структуру поверхні, наявності дефектів та діаметри волокон. Варто зазначити, що оптична мікроскопія часто застосовується для поверхневого огляду макроструктур, проте основними методами аналізу, які здебільшого використовувалися в роботах [4-10], є сканувальна електронна мікроскопія (SEM), атомно-силова мікроскопія (AFM), просвітлювальна електронна мікроскопія (TEM) та ІЧ-спектроскопія Фур'є (FTIR).

Сканувальна електронна мікроскопія — ґрунтується на взаємодії сфокусованого електронного променя з поверхнею зразка, унаслідок чого формується зображення з високою роздільною здатністю. Метод широко застосовується для аналізу морфології поверхні, визначення діаметра волокон, наявності дефектів, злипань чи розривів, а також для оцінки рівномірності та орієнтації волокон у нетканих шарах.

Просвітлювальна електронна мікроскопія — базується на проходженні електронів крізь ультратонкий зразок, що дозволяє отримати інформацію про внутрішню структуру волокон на нанорівні. Метод дає змогу спостерігати фазовий розподіл, розмір пор чи домішок, а також аналізувати товщину

стінок і форму порожнистих волокон у матеріалах, отриманих методом електроформування.

Атомно-силова мікроскопія — використовує гострий зонд, який сканує поверхню зразка, вимірюючи сили взаємодії між зондом і поверхнею. Метод дозволяє отримати тривимірне зображення нанорельєфу без нанесення провідного покриття. Застосовується для аналізу шорсткості, топографії, нанодефектів, а також оцінки механічних властивостей та пружності волокон.

ІЧ-спектроскопія Фур'є — заснована на вимірюванні поглинання інфрачервоного випромінювання функціональними групами полімерів. Дає змогу визначати хімічний склад, тип зв'язків, ступінь зшивання або взаємодії між компонентами композицій. Часто застосовується для підтвердження збереження хімічної структури полімеру після електроформування або виявлення реакцій між полімером і функціональними добавками.

Оцінюють за допомогою тих самих методів, що й для традиційних тканих або сплєтених матеріалів: розривних випробувань, мікротвердометрії та динамічного механічного аналізу (DMA). Розривне випробування дозволяє визначити міцність на розтяг, подовження при розриві та модуль пружності; у випадку електроформованих матеріалів ці показники зазвичай нижчі, ніж у тканих, через хаотичну орієнтацію волокон і високу пористість. Мікротвердометрія дає змогу вимірювати локальні властивості, такі як твердість і пружність, на рівні окремих волокон або наноструктур, при цьому електроформовані волокна зазвичай демонструють більшу варіабельність у порівнянні з класичними тканими матеріалами, де властивості стабільніші. Динамічний механічний аналіз оцінює в'язкоеластичні характеристики, модуль зсуву та втрати енергії при коливаннях навантаження; у нетканих волокнах через пористу і хаотичну структуру модуль пружності нижчий, а втрати енергії більші, тоді як у тканих матеріалах модуль вищий, а втрати енергії мінімальні, що відображає більш орієнтовану та щільну структуру волокон. Механічні характеристики електроформованих нетканих волокон

Висновки. Метод електроформування дозволяє створювати неткані волокнисті матеріали з нанорозмірними волокнами та високою питомою поверхнею, що забезпечує ефективний масо- та теплообмін. Морфологія та механічні властивості матеріалів прямо залежать від параметрів процесу, складу полімерних сумішей та умов навколишнього середовища, контроль параметрів процесу дозволяє одержувати матеріали із заданими властивостями. Оцінка таких потребує застосування високоточних методів аналізу, таких як SEM, TEM, AFM і FTIR. Порівняно з класичними тканими матеріалами, електроформовані волокна характеризуються нижчою міцністю, але значно більшою пористістю і паро-/повітропроникністю, що робить їх особливо привабливими для застосувань у фільтрах, медичних перев'язках, мембранах та сорбентах.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Неткані матеріали / В.П. Плавач, Ю.О. Будащ // Енциклопедія Сучасної України [Електронний ресурс] / редкол. І.М. Дзюба, А.І. Жуковський, М.Г. Железняк [та ін.] ; НАН України,

НТШ. — Київ: Інститут енциклопедичних досліджень НАН України, 2021. — Т. 23. — Режим доступу: <https://esu.com.ua/article-71854>

2. Beachley V., Wen X. Effect of electrospinning parameters on the nanofiber diameter and length // *Materials Science and Engineering*. — 2009 — Vol. 29. — P. 663–668. — DOI: 10.1016/j.msec.2008.10.037

3. Abdulhussain R., Adebisi A., Conway B. R., Asare-Addo K. Electrospun nanofibers: Exploring process parameters, polymer selection, and recent applications in pharmaceuticals and drug delivery // *Journal of Drug Delivery Science and Technology*. — 2023. — Vol. 90. — Article number: 105156. — DOI: 10.1016/j.jddst.2023.105156

4. Liu Y., Wang Y., Lee C.-H., Kan C.-W., Lu X. Influence of electrospinning parameters on the morphology of electrospun poly(3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalerate) fibrous membranes and their application as potential air filtration materials // *Polymers*. — 2024. — Vol. 16, № 1. — Article number: 154. — DOI: 10.3390/polym16010154

5. Can-Herrera L.A., Oliva A.I., Dzul-Cervantes M.A.A., Pacheco-Salazar O.F., Cervantes-Uc J.M. Morphological and Mechanical Properties of Electrospun Polycaprolactone Scaffolds: Effect of Applied Voltage // *Polymers*. — 2021. — Vol. 13, № 4. — Article number: 662. — DOI: 10.3390/polym13040662

6. He H., Kara Y., Molnár K. Effect of needle characteristic on fibrous PEO produced by electrospinning // *Resolution and Discovery*. — 2019. — Vol. 4, №1. — P. 7-11. — DOI: 10.1556/2051.2018.00063

7. Chowdhury, M., & Stylios, G. Effect of experimental parameters on the morphology of electrospun Nylon 6 fibres // *International Journal of Basic & Applied Sciences*. — 2010. — Vol. 10, №6. — P. 70-78.

8. Hekmati AH, Rashidi A, Ghazisaeidi R, Drean J-Y. Effect of needle length, electrospinning distance, and solution concentration on morphological properties of polyamide-6 electrospun nanowebs // *Textile Research Journal*. — 2013. — Vol. 83, №14. — P. 1452-1466. — DOI: 10.1177/0040517512471746

9. Cicenas, D.; Šešok, A. Influence of Different Solvents on the Mechanical Properties of Electrospun Scaffolds // *Materials*. — 2025. — Vol. 18, №2. — Article number: 355. — DOI: 10.3390/ma18020355

10. Huang, Fenglin, Wei, Qufu, Wang, Jiayi, Cai, Yibing and Huang, Yubo. Effect of temperature on structure, morphology and crystallinity of PVDF nanofibers via electrospinning // *e-Polymers*. — 2008. — Vol.8, №1. — P. 152-160. — DOI: 10.1515/epoly.2008.8.1.1758

2.12 ДОСЛІДЖЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ВИСОКОАДГЕЗИВНИХ КОМПОЗИТІВ

Земке В. М., Чопик Н. В., Братичак М. М.

Національний університет «Львівська політехніка», Україна

viktoriiia.m.zemke@lpnu.ua

Досліджено вплив концентрації водного розчину полівінілпіролідону з різною молекулярною масою, а також концентрація та природа низькомолекулярних доданків на зміни кута змочування. Розраховані значення адгезивної здатності композицій, що характеризуються роботою адгезії.

Ключові слова: адгезійна здатність, низькомолекулярний доданок, кут змочування, робота адгезії.

Останні роки актуальною є проблема пошуку матеріалів ортопедичного застосування для синтетичної заміни та регенерації кісткових тканин. В сучасній практиці більшість технологій, що базуються на створенні модифікованих полімерних матеріалів вирішальну роль відіграють полімери з високою поверхневою активністю [1]. Аналіз адгезійної поведінки широко використовує термодинамічний підхід, що передбачає вивчення утворення адгезійного контакту та взаємодії контактуючих поверхонь. Оскільки ці проблеми тісно пов'язані з розглядом міжфазних процесів, то найбільшу увагу приділяють оцінюванню явищ змочування та розтікання, де кількісним параметром є крайовий кут θ [2].

Дослідження проводили визначаючи кут змочування вимірюючи параметри краплі: висота h і діаметр d за допомогою приладу основними вузлами якої є мікроскоп (типу МБС-9) з градуйованим окуляром, дзеркало встановлене під кутом 45° і освітлювальний пристрій, що забезпечує контрастне зображення краплі і досліджуваної поверхні. За допомогою піпетки краплю наносять на поверхню пластинки біля самого її краю, оберненого убік дзеркала. Для отримання відтворюваних результатів необхідно наносити краплі приблизно однакових розмірів, так щоб діаметр їх основи не перевищував 2-3 мм. При визначенні висоти краплі h шкалу окуляр-мікромметра повертають навколо тубуса на 90° .

Для проведення досліджень приготували водний розчин ПВП концентрацій 0,5; 1; 1,5 і 2 % для різних молекулярних мас 12 тис, 28 тис. та 360 тис. Дослідження проводили з використанням різного типу підкладок: «стальна пластина», «кераміка глянец», «кераміка необроблена», «скло силікатне», «скло органічне», «кістка». Дослідження показали, що всі залежності мають змінний характер [3].

Так, із збільшенням молекулярної маси ПВП та його концентрації у водному розчині, кут змочування зростає для більшості підкладок і має

нелінійний характер рис 1. Для підкладки «стальна пластина» з вмістом ПВП у водному розчині 15% \bar{M} 28 тис. спостерігається значне зменшення кута змочування. Для тієї ж концентрації ПВП у воді, але підкладок «кераміка глянец», «кістка» - кут змочування збільшується для найменшої молекулярної маси. Найбільш стабільний характер кривих спостерігається для розчинів з \bar{M} ПВП 28 тис.

Порівнюючи керамічні підкладки спостерігається збільшення кута змочування для розчинів ПВП \bar{M} 28 тис. на необробленій поверхні у порівнянні з глянцевою поверхнею. Аналогічна залежність спостерігається порівнюючи підкладки «скло силікатне» і «скло органічне». Для підкладки «кістка», спостерігається змінний характер залежності кута змочування від концентрацій полівінілпіролідону у водному розчині.

Також нами було досліджено залежність кута змочування θ від \bar{M} ПВП на різних підкладках за концентрації водного розчину ПВП 2.5%, 5%, 10%, 15% та 20%. При вмісті водного розчину ПВП 2.5% зі збільшенням \bar{M} ПВП кут змочування зростає на всіх підкладках, окрім підкладки «стальна пластина». Тут кут змочування має тенденцію до зменшення. Із встановленої залежності зміни кута змочування від \bar{M} ПВП, спостерігається мінімальне значення при \bar{M} ПВП 28 тис. для всіх підкладок крім «стальна пластина».

Аналогічна ситуація відбувається і при концентрації водного розчину ПВП 5%. Хоча, для підкладки «кістка» характер кривої змінюється в дзеркальному відображенні.

При зростанні концентрації водного розчину ПВП практично вже на всіх підкладках спостерігається збільшення кута змочування.

Тільки при концентрації водного розчину ПВП 15% бачимо, що на підкладці «стальна пластина» відбувається зменшення кута змочування при ПВП \bar{M} 28 тис., а при \bar{M} 360 тис. кут змочування стрімко зростає.

Із визначених залежностей найбільш оптимальними властивостями володіють розчини ПВП \bar{M} 28 тис. Тому подальші наші дослідження будемо проводити на основі ПВП даної молекулярної маси.

Наступним кроком в дослідженнях було вивчення впливу концентрації та природи низькомолекулярних доданків на кут змочування. В якості доданків використовували ортофосфорну кислоту (H_3PO_4), ізопропіловий спирт, лецитин у концентраціях 0.3, 0.5 і 1%. Як бачимо нами використані доданки з різними фізико-хімічними структурними та іншими властивостями [4].

Для досліджень готували водні розчини з вмістом ПВП 0.5%, 1%, 1.5%, 2% та методом заміщення вводили низькомолекулярні доданки. На прикладі ортофосфатної кислоти (H_3PO_4) на рис.2 представлені залежності кута змочування від концентрації доданку.

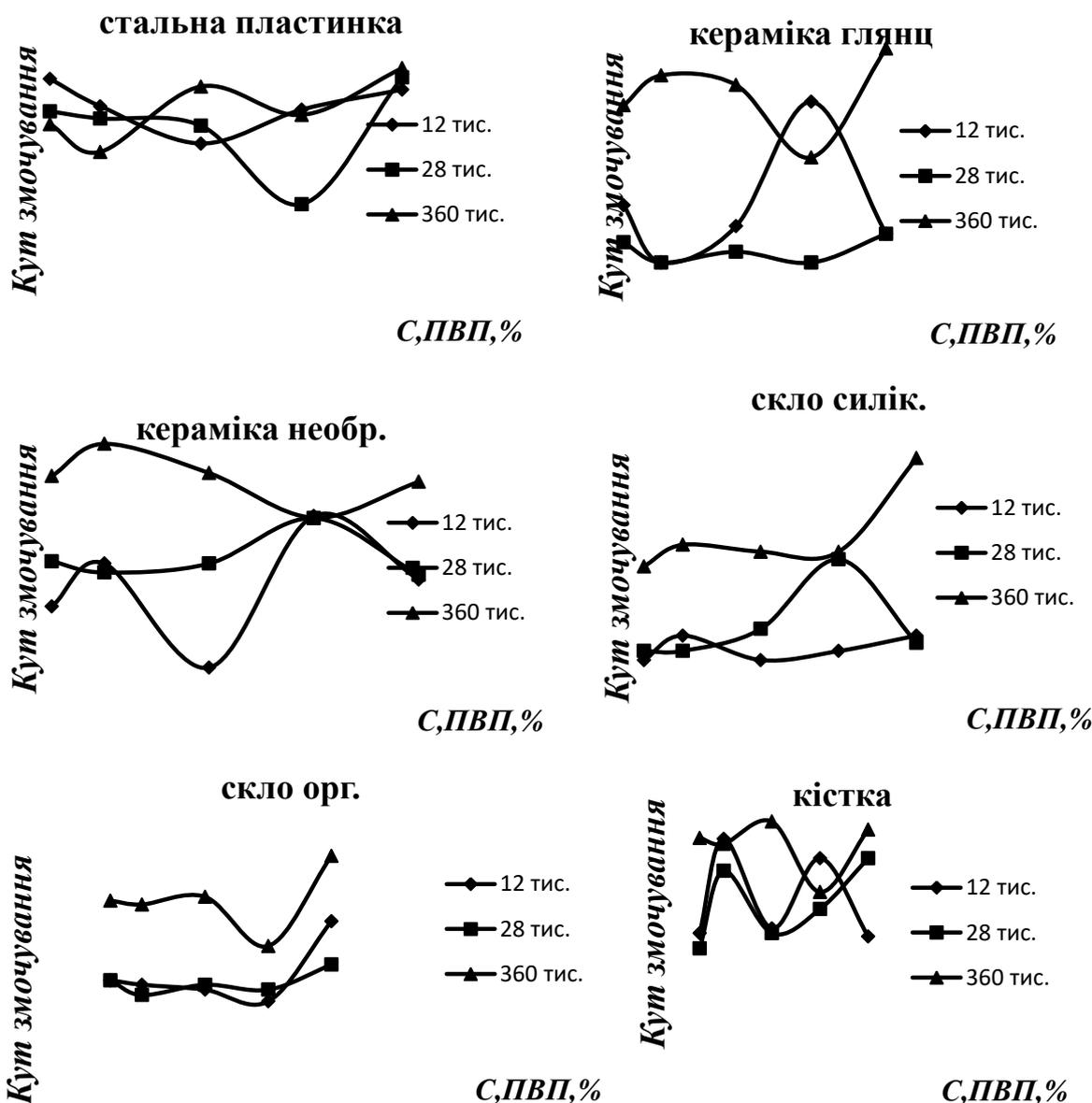


Рис.1 Залежність кута змочування θ від \bar{M} ПВП та концентрації водного розчину.

Полівінілпіролідон підлягає різноманітним перетворенням під впливом кислот, при чому характер реакції суттєво залежить від природи кислоти та її концентрації. Дослідження проводили на підкладках: «стальна пластинка», «кераміка глянець», «кераміка необроблена», «скло силікатне», «скло органічне», «кістка».

На підкладці «стальна пластинка» - спостерігали, що із збільшенням вмісту H_3PO_4 кут змочування зменшується у порівнянні з чистим розчином ПВП. Хоча при вмісті ПВП 2% відзначається деяке зростання кута змочування для всіх концентрацій. У випадку підкладки «кераміка глянець», «скло органічне» значення θ зростає при вмісті H_3PO_4 0,5 і 0,3% відповідно.

Підкладка «кераміка необроблена» характеризується стрімким падінням значень кута змочування і деяким зростанням значення θ при концентрації ПВП 2% для всіх концентрацій H_3PO_4 . Із зростанням концентрації H_3PO_4 та ПВП, кут змочування θ падає для підкладки «скло

силікатне», а для вмісту 0.3% H_3PO_4 спостерігається взагалі лінійний характер кривої із зростанням концентрацій ПВП у розчині. При максимальному вмісті H_3PO_4 у розчині відбувається стрімке падіння значення кута змочування. Хоча таж концентрація у випадку підкладки «скло органічне» дає зростання значення кута змочування в максимальній концентрації ПВП.

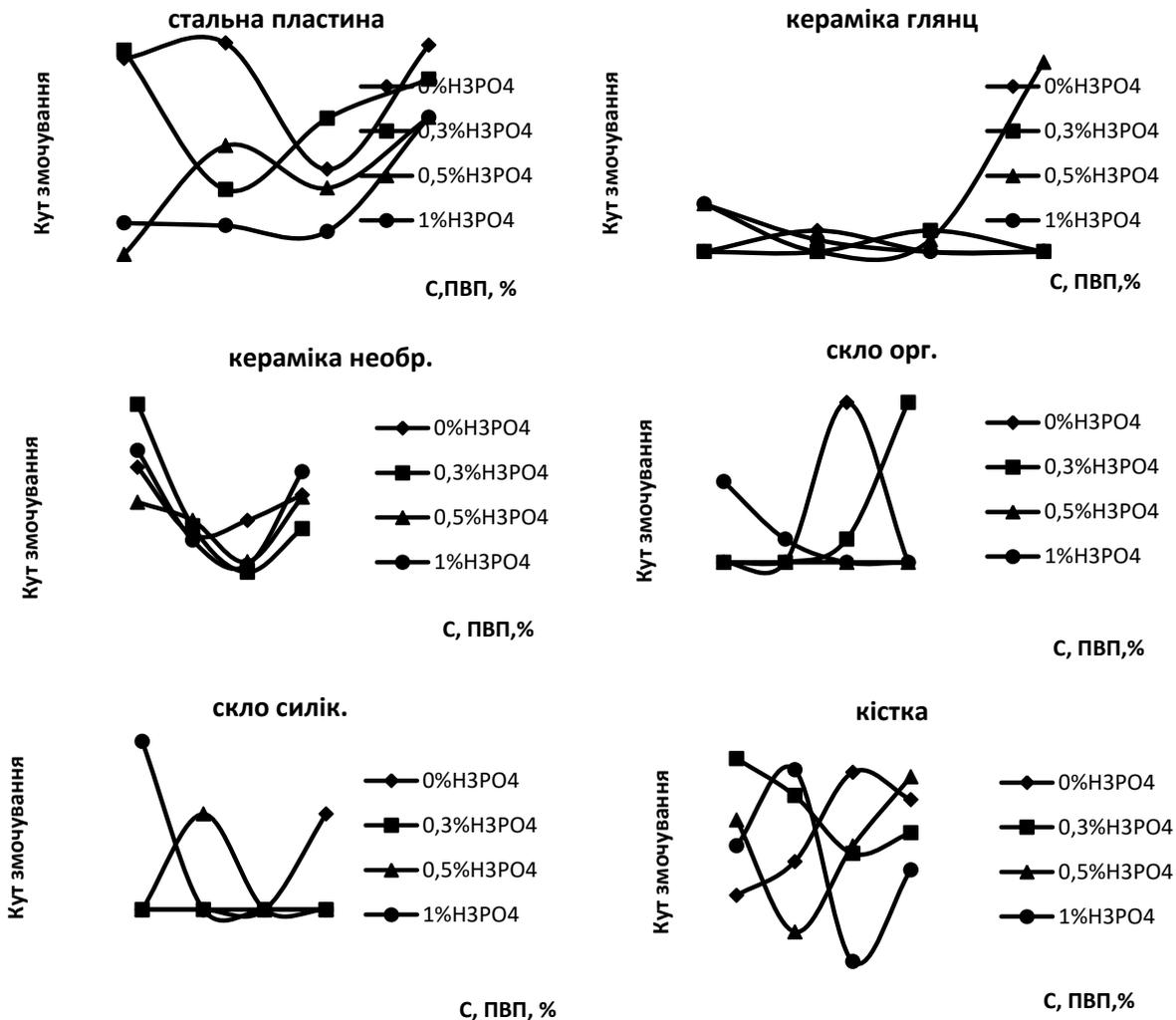


Рис. 2. Залежність кута змочування θ від концентрації H_3PO_4 у водному розчині ПВП \bar{M} 28тис.

У випадку підкладки «кістка» із зростанням вмісту H_3PO_4 призводить до змінного характеру кривих і спостерігається зменшення значення θ [3, 5].

Після визначення кута змочування нами було також розраховане відношення роботи адгезії до роботи когезії, для композицій з H_3PO_4 , за комбінованим рівнянням Дюпре-Юнга:

$$W_a/W_k = (1 + \cos\theta)/2 \dots \dots \dots (1)$$

З рівняння 1 виходить, що для збільшення змочування необхідно збільшити роботу адгезії чи зменшити роботу когезії. Розраховані дані для всіх розчинів наведені в таблиці 1.

Таблиця 1. Відношення роботи адгезії до роботи когезії

Матер підлож	W_a/W_k											
	ПВП 0.5%			ПВП 1%			ПВП 1.5%			ПВП 2%		
	Чист	H_3PO_4 0.3%	H_3PO_4 1%	Чист	H_3PO_4 0.3%	H_3PO_4 1%	Чист	H_3PO_4 0.3%	H_3PO_4 1%	Чист	H_3PO_4 0.3%	H_3PO_4 1%
стальна пластин	0.923	0.918	0.994	0.913	0.986	0.994	0.979	0.958	0.995	0.914	0.936	0.957
керамік глянц.	0.999	-	0.996	0.998	0.999	-	0.999	0.998	0.999	0.999	0.999	0.999
керамік необр.	0.968	0.952	0.964	0.982	0.980	0.983	0.979	0.988	0.987	0.974	0.981	0.969
скло органіч	-	0.999	0.997	-	0.999	-	0.992	0.999	0.999	0.999	0.992	0.999
скло силікат	0.999	0.999	0.998	-	0.999	-	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999
природ кістка	0.963	0.936	0.954	0.957	0.944	0.939	0.939	0.956	0.974	0.938	0.952	0.959

Для порівняльної характеристики одержаних результатів з H_3PO_4 у водні розчини ПВП тих самих концентрацій замість H_3PO_4 вводили ізопропіловий спирт у концентраціях 0.3, 0.5, 1% з тим самим набором підкладок. Із зростанням концентрації ізопропілового спирту у водному розчині ПВП для «стальної пластини» спостерігається зменшення значення кута змочування із зростанням концентрації ПВП. Для «кераміки глянц» - зростання ізопропілового спирту суттєво не впливає на θ . Що не скажеш про підкладку «кераміка необроблена», де із зростанням вмісту ПВП у розчині, та зі збільшенням концентрації ізопропілового спирту відбувається поступове зростання кута змочування.

При вмісті ізопропілового спирту 0.3% відбувається різке зменшення значення θ при концентрації ПВП 1% у водному розчині з наступним незначним зростанням, для решти концентрацій суттєвих змін не спостерігається для підкладки «скло органічне». У випадку підкладки «скло силікатне» вплив ізопропілового спирту на значення кута змочування θ не спостерігається. Що стосується підкладки «кістка», водний розчин ПВП 1% характеризується збільшенням кута змочування при мінімальному вмісті ізопропілового спирту. Збільшення концентрації ПВП у розчині призводить до падіння значень θ . Аналогічно проводили розрахунок параметру відношення роботи адгезії до роботи когезії за рівнянням 1 [3, 5].

Нами були проведені дослідження із введенням у водні розчини ПВП лецитину в концентраціях 0.3, 0.5 і 1% рис.10. Спостерігали наступні зміни: для підкладки «стальна пластини» по відношенню вихідного розчину ПВП значення кута змочування впав, тільки при вмісті ПВП 2% у

водному розчині і з 1% вмістом лецитину значення кута θ дещо збільшилось. Така ж картина спостерігається і для підкладки «кераміка глянец». І останні концентрації як для ПВП, так і для лецитину мають більші значення кута змочування θ . Для підкладки «кераміка необроблена» - із зростанням вмісту ПВП та вмісту лецитину в загальному збільшується значення кута змочування θ . У випадку «скло органічне» введення лецитину суттєво не вплинуло на значення кута змочування. Із збільшенням концентрації ПВП у водному розчині кут змочування θ зростає для концентрації лецитину 0.3 і 1% і має аналогічний характер, як і для чистих розчинів ПВП. Для підкладки «кістка» значення θ із зростанням вмісту лецитину є меншими по відношенню до вихідного розчину ПВП. Хоча має зростаючий характер з концентраціями ПВП 1.5 і 2%. Для композицій з лецитином також розраховували відношення роботи адгезії до роботи когезії за рівнянням 1 [3, 5].

Висновки. Встановлено, що у випадку введення ортофосфорної кислоти зі збільшенням її концентрації та збільшенням концентрації ПВП загальною значення кута змочування θ зменшується. Введення ізопропілового спирту у водний розчин ПВП призводить до покращення адгезійної здатності лише для підкладок типу «сталева пластина» та «органічне скло». При введенні лецитину спостерігалось покращення адгезійної здатності у порівнянні з вихідним розчином ПВП.

Проведені дослідження адгезивної здатності полімерних композицій методом оцінки крайового кута змочування. Встановлено вплив доданків різної природи на адгезивну здатність, що визначалася роботою адгезії.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Rusu, V., Ng, C-h., Wilke, M., Tiersch, B., Fratzl, P., & Peter, M. (2005). Size-controlled hydroxyapatite nanoparticles as self-organized organic-inorganic composite materials. *Biomaterials*, 26(26), 5414–5426. doi.org/10.1016/j.biomaterials.2005.01.051
2. Cai, A., Chen, Y., Zhang, X., Zou, J., Yang, J., Mondal, A. K., Wu, Y., & Tang, Z. (2024). Facile strategy of supramolecular adhesives based on water-soluble polymers and tannic acid. *Polymer*, 308, 127343. doi.org/10.1016/j.polymer.2024.127343
3. Suberlyak, O., Bratychak, M., Zemke, V., & Chopyk, N. (2014). Effect of the Low-molecular Additives Nature on the Adhesive Properties of Based on Polyvinylpyrrolidone Compositions. *Chemistry & Chemical Technology*, 8(4), 411–417. doi.org/10.23939/chcht08.04.411
4. Bratychak, M., Chopyk, N., & Zemke, V. (2016). Effect of Hydroxyapatite on the Glue Line Strength of the Compositions Containing Polyvinylpyrrolidone. *Chemistry & Chemical Technology*, 10(4), 473–478. doi.org/10.23939/chcht10.04.473
5. Zemke, V., Chopik, N., Bratichak, M., & Pirozhok, A. (2023). Analiz adgezijnoyi povedinki polivinilpirolidonovih kompozicij. *U XXI Vseukrayinska konferenciya molodih vchenih ta studentiv z aktualnih pitan suchasnoyi himiyi* (s. 52–54). Dniprovskij nacionalnij universitet im. Olesya Gonchara. <https://www.dnu.dp.ua/docs/ndc/2023/materiali%20konf/>

2.13 ЄВРОПЕЙСЬКІ ПІДХОДИ ДО ВИКЛАДАННЯ ЗАГАЛЬНОЇ ТА НЕОРГАНІЧНОЇ ХІМІЇ В СТАРШІЙ ШКОЛІ НА ПРИКЛАДІ ІТАЛІЇ

Четвертак Т. Ю., Дюжикова Ю. Ю., Кулик І. О.

Мелітопольський державний педагогічний університет
імені Богдана Хмельницького, Україна
shafranskaja@ukr.net

Завдання дослідження полягає в оприлюдненні підходів до викладання загальної та неорганічної хімії в італійській старшій школі з метою подальшої успішної євроінтеграції вітчизняних підходів в хімічній освіті.

Ключові слова: хімічна освіта, загальна та неорганічна хімія, хімічні дисципліни, італійська старша школа

Тенденції європейської освіти зазнали суттєвих змін з плином часу, відтак, закордонні вчені наголошують, що «у цифрову епоху, успішність країн залежить багато в чому від прогресу в побудові суспільства знань, а цифровий розвиток відіграє ключову роль у прискоренні економічного і соціального розвитку країн в цілому. Означене призводить до нової, цифрової системи, в якій моделі з обох сфер взаємодіють та породжують складні екосистеми, які зараз піддаються організаційній, інституційній та регуляторній трансформаціям. На рівні суспільства цифровий розрив призводить до змін у спілкуванні, взаємодії та моделях споживання, це відображується у більшому попиті на цифрові пристрої, програмне забезпечення з більшою функціональністю, хмарні обчислення і послуги трафіку даних і базові цифрові навички, необхідні для використання пов'язаних технологій» [1,]. Поділяємо думку науковців, стосовно змін в підходах до хімічної освіти в цілому, і в окремих європейських країнах, спричинених швидким розвитком цифрових технологій. Відтак, матеріали статті відображають основні сучасні підходи до викладання загальної та неорганічної хімії в італійській старшій школі з врахуванням тенденцій цифровізації освітнього процесу.

Виклад основного матеріалу

Підходи до викладання загальної та неорганічної хімії в італійській старшій школі характеризуються різноманітністю та широким використанням, як традиційних методів навчання, так і сучасних підходів до вивчення хімічних дисциплін. Розглянемо основні методи, серед яких, найбільш широко вживаними визначено експериментальний метод в хімії. Такий метод є перспективним у вітчизняній практиці, адже, як запевняють вчені Б.О. Жалій та О.А. Куленко, експериментальний метод в хімії має декілька суттєвих переваг: «по-перше, здійснюється спостереження за об'єктами, які підлягають дослідженню, з'ясуванню їх зовнішніх характерних ознак і властивостей; по-друге, формується гіпотеза або наукове припущення, яке визначає мету експерименту, яку потрібно здійснити та довести; по-третє, проводиться планування експерименту,

який забезпечує умови, які дозволяють слідкувати за проходженням експерименту, які намічають практичні дії досягнення мети (способи дослідження, фіксації отриманих результатів тощо). Після цього експеримент виконується відповідно до плану. Отримані результати підтверджують або заперечують гіпотезу. Остаточна перевірка гіпотези відбувається за допомогою широкої практики» [3, с. 96]. Відтак, етапи експериментального методу, що застосовуються в італійській старшій школі, включають: попереднє спостереження, визначення хімічної проблеми (з встановленням незмінної невідомої та пов'язаних змінних невідомих, проведенням власне хімічних експериментів та оформленням результатів графічно); формування гіпотези на основі хімічних експериментальних даних; хімічний експеримент для перевірки сформуваного припущення; збір та обробка хімічних даних; формування результатів та відтворення їх у вигляді змінної блок-схеми; постановка запитань хімічного змісту з метою уточнення з використанням концептуальних карт [2].

Наступним методом, який також займає ключове місце серед інших в італійській старшій школі, є метод розв'язування хімічних проблем. Такий метод тісно пов'язаний з оприлюдненим раніше вітчизняними науковцями алгоритмічним підходом до розв'язування хімічних проблем. Зазначений підхід полягає у тому, що «алгоритмічні інструкції застосовуються в таких випадках, як: при складанні реакцій різних типів на основі аналогії; при розв'язуванні різних типів розрахункових завдань; при складанні хімічних формул на основі валентності атомів елементів; для характеристики хімічних елементів на основі їхнього розташування в періодичній системі; для опису властивостей речовин; під час порівняння фізичних та хімічних властивостей речовин; для встановлення причинно-наслідкових зв'язків між зарядом ядра атома та його будовою, а також між будовою речовини та її властивостями; під час проведення лабораторних та практичних робіт; при виконанні домашніх експериментів; при складанні структурних формул речовин» [4, с. 332].

Запропонований метод розв'язування хімічних проблем, що застосовується в італійській старшій школі, поєднує набуті теоретичні знання з хімії, хімічний досвід і використання лабораторної частини для експериментальної перевірки отриманих знань. Використання методу передбачає обов'язкову наявність роздаткового матеріалу (рис. 1), забезпечення здобувачів хімічної освіти навчально-методичного супроводу, у вигляді рекомендацій до практичних занять. Несуттєвим недоліком такого логічно-послідовного та структурованого підходу є необхідність документування лабораторних занять із загальної та неорганічної хімії, і як наслідок, відсутність повною мірою формування навичок планування та критичного мислення у здобувачів освіти, адже проблематика вивчення хімічної теми побудована таким чином, що існує виключно чіткий план проведення лабораторного заняття. При цьому, зазначимо, що стратегія проблемного навчання передбачає активацію

пізнавальної активності здобувачів освіти, дає змогу поєднати об'ємні хімічні теорії, чіткі процедурні аспекти хімічного матеріалу та ретельне спостереження за лабораторними дослідженнями. Часто з цією метою застосовують V-діаграми Говіна та цифрові електронні засоби [2].

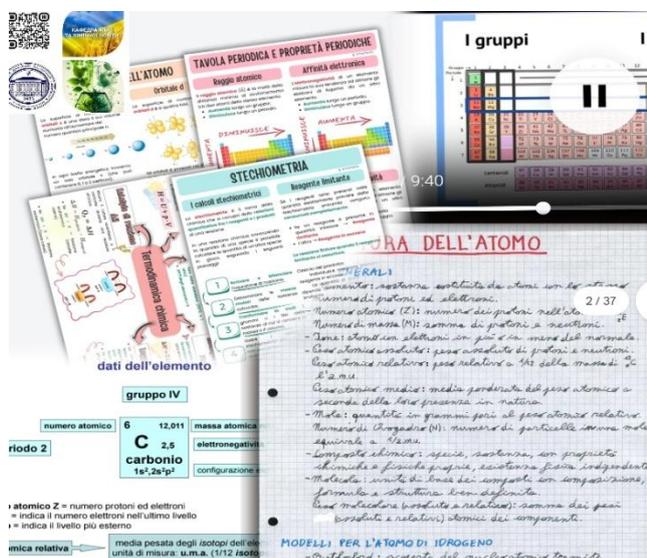


Рис. 1. Методичні рекомендації до проведення лабораторних занять із загальної та неорганічної хімії в італійській старшій школі

Ще одним методом викладання загальної та неорганічної хімії, що застосовується в італійській старшій школі, є використання концептуальних карт під час надання теоретичного матеріалу з хімії. Концептуальні карти із загальної та неорганічної хімії відповідають певній ієрархії. Запропоновані карти не слід плутати з «картами розуму» або «ментальними картами», адже останні складаються тільки з ієрархічних, деревоподібних структур і припускають наявність в центрі основного поняття. В той час, концепт-карти, як зазначає вчена Н. Борисова, «це семантична сітка, математичною мовою концепт-карта – це граф, у вершинах якого розташовані поняття, а ребра графа відображають зв'язки між поняттями.

Поєднуючи концепти за допомогою фраз, які розкривають зміст зв'язку між ними, отримують твердження. Концепткарти виникли, як засіб візуалізації представлення знань у дітей, а потім стали використовуватися, як інструмент для наукових досліджень і вирішення практичних завдань. Попри схожість інтелект карт і концепт-карт, ці два методи розрізняються за багатьма аспектами, проте комп'ютерні програми, зокрема програми, які служать для створення концептуальних карт, дозволяють будувати й інтелект карти. Щодо концептуальних карт, то графічна техніка використовується, щоб представляти знання через структурування мережі пов'язаних концептів» [5, с. 24].

Основними характеристиками концепт-карт, як зазначає дослідниця Л. Бутенко, є такі: «фокус-запитання, концепти, зв'язувальні слова та

фрази, список концептів («стоянка ідей»), семантична структура, ієрархічна структура, перехресні покликання. Фокус-запитання завдає теми концепт-карти або проблему, для аналізу та вирішення якої вона складається. Фокус-запитання зумовлене певним контекстом, у межах якого відбувається аналітична та пошукова робота. Фокус-запитання розглядається як: визначення, формулювання проблеми, на аналіз та вирішення якої спрямована концепт-карта; поняття, для розкриття сутнісних та функційних характеристик якого створюється концепт-карта. Концепти. Концепт є лаконічне формулювання (зазвичай в одне слово), що пов'язано із поняттями предметної галузі, представляє досліджувану ситуацію, закономірності в подіях, об'єктах та ситуаціях» [7, с. 8]. Відтак, і розглянутий італійський досвід використання концептуальних карт в хімічній освіті продемонстрував широкий попит здобувачів освіти на необхідну структурування хімічних знань. Концептуальні карти дозволяють створити послідовний каркас з різними рівнями. Італійські викладачі впевнені [2], що ефективність концептуальних карт заснована на формування зорової пам'яті, але потребують суворої заборони механічного запам'ятовування. Часто концептуальні карти безпосередньо використовують під час проведення лабораторних занять із загальної та неорганічної хімії в італійській старшій школі.

Серед сучасних методик, які застосовують італійськими вчителями на заняттях із загальної та неорганічної хімії, слід виділити: метод презентацій, діаграм та ідеограм, який набув популярності саме зараз. Досвід використання діаграм підтримують вітчизняні вчені, які наголошують на доцільності візуалізації хімічної інформації засобами діаграм. У своїх працях, вчений Ю. Карпенко, зазначає, «що однією з форм навчання з використанням візуалізації є застосування інтерактивних інструментів, які дають змогу активно досліджувати та вивчати хімічні концепції та процеси. Наприклад, інтерактивні макети молекули можуть бути використані для дослідження будови й властивостей молекули, що допомагає здобувачам освіти краще зрозуміти структуру та функцію різних молекулярних сполук.

Ще одна форма навчання з використанням візуалізації інтерактивні відеозаняття і стимуляційні центри. Ці інструменти дають змогу наочно спостерігати за хімічними процесами та реакцією, що сприяє усвідомленню, як ці процеси відбуваються на молекулярному рівні. Використання інтерактивних відеозанять і симуляцій також допомагає перевірити своє розуміння матеріалу шляхом виконання завдання та тестів, що уможливорює покращення їх знань та вмінь. Зауважимо, що використання візуальних презентацій і діаграм також є ефективним способом навчання хімії» [6, с. 59]. Доволі поширений досвід на заняттях із загальної та неорганічної хімії в італійській старшій школі, коли викладачі використовують гістограми, ареограми, декартові діаграми, саме з метою повної візуалізації хімічних процесів (рис. 2).

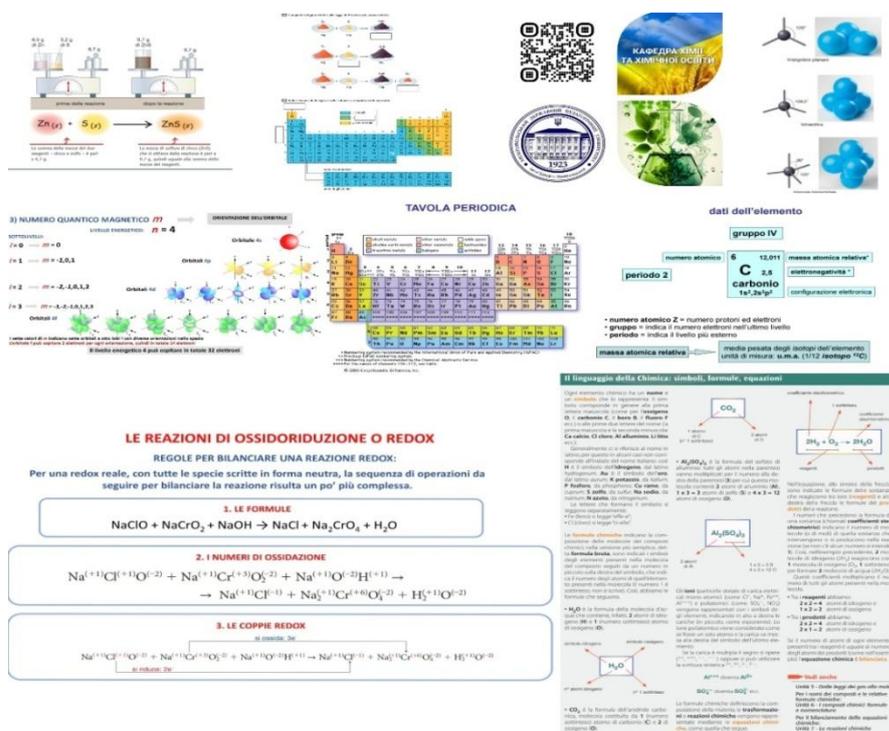


Рис. 2. Візуалізація навчального матеріалу на заняттях із загальної та неорганічної хімії в італійській старшій школі

Висновки. Отже, в матеріалах статті оприлюднено підходи до викладання загальної та неорганічної хімії в італійській старшій школі з метою подальшої успішної євроінтеграції вітчизняних підходів в хімічній освіті. Серед основних методів визначено експериментальний метод, метод розв’язування хімічних проблем, використання концептуальних карт під час надання теоретичного матеріалу з хімії, метод презентацій, діаграм та ідеограм для візуалізації навчального матеріалу хімічного змісту.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Сталий розвиток XXI століття. Дискусії 2021: матеріали VI Міжнародної науково-практичної конференції. Національний університет «Києво-Могилянська академія». 2021. 527 с. ISBN: 978-617-7668-33-5.
2. Дидактичні матеріали вивчення загальної та неорганічної хімії. <https://www.chimica-online.it/generale.htm>.
3. Жалій Б.О., Куленко О.А. Особливості формування дослідницьких умінь школярів за допомогою хімічних експериментальних завдань. XVI Менделєєвські читання: зб. наук. праць Всеукр. наук.-практ. конф., (м. Полтава, 14–15 березня 2023 р.). Полтава : ПНПУ імені В. Г. Короленка. 2023. С. 94–98.
4. Котляревська Л.А., Харченко Ю.В. Алгоритмічний підхід при вивченні хімії. *Grail of Science*. 2023. С. 331-334. 10.36074/grail-of-science.10.11.2023.52.
5. Борисова Н. Концепт-карта як дієвий засіб навчання іноземної мови. *Psycholinguistics in a Modern World*. 2020. № 15. С. 22-25. 10.31470/2706-7904-2020-15-22-25.
6. Карпенко Ю. Використання методів візуалізації при вивченні студентами хімічних дисциплін. *Scientific notes of Junior Academy of Sciences of Ukraine*. 2023. С. 57-64. 10.51707/2618-0529-2023-26-07.
7. Бутенко Л.Л. Концепт-карти як засіб методологізації загальнопедагогічної підготовки майбутніх учителів. *Education and pedagogical sciences*. 2022. № 1. С. 3-16. http://nbuv.gov.ua/UJRN/OsDon_2022_1_2.

2.14 ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОАКТИВНИХ ПОЛІМЕРНИХ ПЛІВОК

Макєєва І. С., Якубовська К. К.

Київський національний університет технологій та дизайну, Україна
makueyeva.is@knutd.edu.ua

У роботі були електрохімічно синтезовані плівки поліаніліну на поверхні графітового електроду. У якості допантів при електросинтезі використовували різні кислоти, а саме H_2SO_4 , HNO_3 , HCl , $HClO_4$. Досліджено вплив умов електросинтезу на товщину електропровідних полімерних плівок та на величину їх електропровідності.

Ключові слова: поліанілін, електросинтез, полімерні плівки, електропровідність

Дослідження електрохімічної полімеризації традиційно направлені на формування полімерних покриттів на електропровідних підкладках, які в результаті модифікування отримують різноманітні практичні властивості. Електрохімічна полімеризація виключає з технологічної схеми ступінь попереднього синтезу полімерної речовини, її наступного розчинення чи диспергування та фіксацію на підкладці. При електрохімічному синтезі всі ці операції об'єднані в одному циклі. Також при такому синтезі спостерігається висока швидкість формування плівок та можливість автоматизації процесу. Керування швидкістю процесу відбувається шляхом зміни сили струму. Контроль потенціалу електролізу дозволяє регулювати механізм полімеризації. Зміна умов електролізу робить можливим впливати на склад та молекулярну масу полімеру та отримувати матеріали з новими властивостями. В процесі електрохімічної полімеризації утворення полімеру з мономеру відбувається у м'яких умовах (густина струму не перевищує редокс - потенціали вихідних мономерів, кімнатна температура та атмосферний тиск). Такі умови спрощують технологічний процес та роблять його універсальним, виключаючи деградацію електрохімічно або термічно нестійких сполук.

В останній час значно виріс інтерес до електропровідних органічних матеріалів, що пов'язано з розвитком нових галузей науки і техніки, зокрема, нанотехнологій, засобів відображення інформації, перетворювачів енергії нового типу, а також з необхідністю зменшення витрат матеріалів [1].

Електропровідні полімери, які ще часто називають «органічними металами», викликають досить великий інтерес в світі, за рахунок їх незвичайних фізико-хімічних та електрохімічних властивостей, а також в зв'язку з можливими перспективами застосування цих матеріалів в різноманітних галузях техніки та технологій [2-4].

Поліанілін займає особливе місце серед провідних полімерів [5]. При синтезі поліаніліну в різних умовах у присутності органічних та неорганічних кислот його електропровідність відрізняється, а при хімічних

перетвореннях в інші можливі форми, провідність полімеру різко знижується (на 5-7 порядків). Дослідити вплив деяких кислот на електропровідність полімеру було метою цієї роботи. Об'єктом дослідження були електросинтезовані плівки поліаніліну, предметом дослідження – властивості таких плівок.

Електрохімічний синтез поліаніліну здійснювали за допомогою гальваностатичного режиму при густині струму 4 А/дм^2 протягом 24 годин у трьохелектродній комірці, яка складалась з робочого та допоміжного електроду, виготовлених з графіту. Електродом порівняння слугував хлорсрібний електрод.

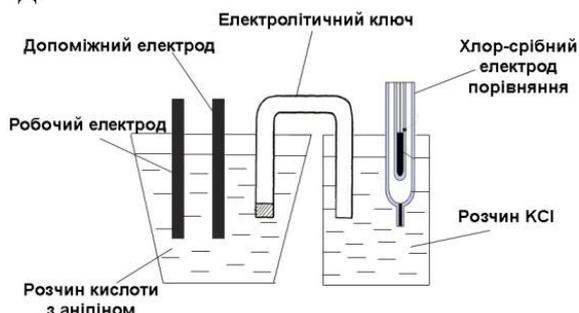


Рис. 1. Електрохімічна комірка для синтезу поліаніліну

Електроліт складався з 0,1М аніліну, розчиненого в 1М розчині неорганічних кислот. В якості кислот використовували: сірчану (H_2SO_4), азотну (HNO_3), соляну (HCl), перхлоратну (HClO_4) кислоти.

Після отримання плівки на поверхні графітового електроду, її обережно знімали на фільтрувальний папір, промивали 0,01М розчином відповідної кислоти, потім дистильованою водою. Отриманий фільтрат висушували при температурі 50°C у сушильній шафі, після чого сухий поліанілін був вилучений з фільтрувального паперу. Для визначення електрохімічних властивостей плівок поліаніліну використовували метод циклічної вольтамперометрії (ЦВА). Вольтамперні залежності знімалися в трьохелектродній комірці, де синтезований полімер поміщали на торець робочого графітового електрода. В якості електроліту використовували 1М розчин тієї кислоти яка використовувалась при синтезі полімерних плівок. Швидкість розгортки потенціалу складала 1 мВ/с . Для знаходження питомого опору зразка застосовували чотирьохзондовий метод. Для розрахунку електропровідності використовували данні по відстані між зондами, падіння напруги на вимірювальних зондах і струм, що протікає через зразок.

За даними синтезу були побудовані графіки залежності напруги (U) від часу (t) для всіх зразків. На всіх кривих спостерігався початковий максимальний стрибок потенціалу у межах від 0,7 до 0,85 В, в залежності від виду кислоти-допанта. Це свідчить про те, що процес синтезу поліаніліну є автокаталітичним. На всіх залежностях напруги (U) від часу (t) спостерігається плато. Для сірчаної кислоти воно знаходиться на рівні 0,55 В, для азотної – 0,6 В, для соляної та для перхлоратної на рівні 0,65 В відносно хлорсрібного електроду порівняння. В подальшому

спостерігається підвищення потенціалу, більш різке в випадку азотної та сірчаної кислот, та пологіє у випадку соляної та перхлоратної.

Тонкі плівки електропровідного полімеру на електроді були отримані шляхом електрохімічного окислювання 0.1М розчину мономеру в електроліті у режимі циклування потенціалу. Типові циклічні вольтамперні залежності електросинтезу плівок приведені на рисунку 2.

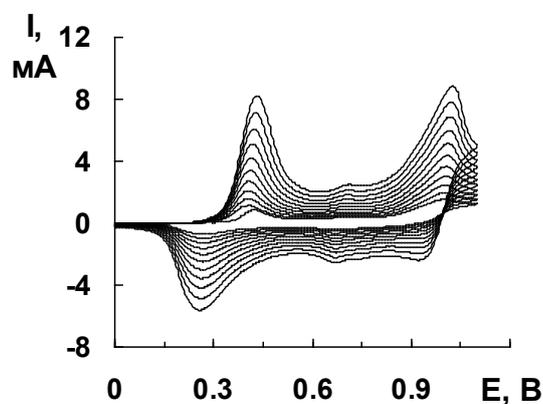


Рис. 2. Циклічні вольтамперні залежності електрохімічного синтезу електропровідної полімерної плівки з електроліту складу: 0.1М аніліну в 1М розчині сірчаної кислоти

Електроосадження відбувалось у два етапи: а) осадження початкової плівки в діапазоні потенціалів від 0 до 1.3 В; б) електроосадження заданої товщини електропровідної плівки у звуженому діапазоні потенціалів від 0 до 1,1 В. Електросинтез електропровідної полімерної плівки дозволяє отримати електроди з контрольованою товщиною полімеру та уникнути переокислення плівки полімеру. Товщина поліаніліну залежить від кількості циклів. На рисунку 3 приведено структуру поліаніліну, отриманого на другому і десятому циклі ЦВА.

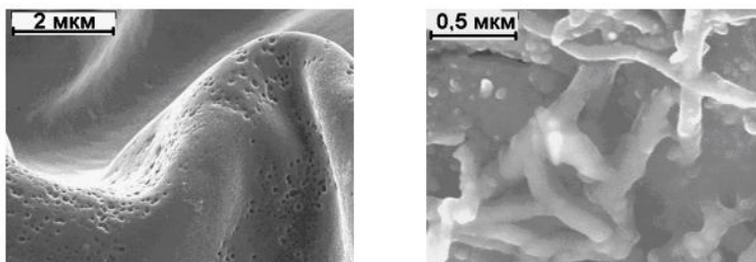


Рис. 3. Мікрофотографії шарів поліаніліну, отриманих на другому (ліворуч) та десятому циклі ЦВА (праворуч) в 1М розчині H_2SO_4 .

Осаджена плівка електропровідного полімеру на перших циклах ЦВА є щільною. Більш пухкий шар плівки формується вже на поверхні щільної полімерної плівки. Із збільшенням товщини плівки спостерігається збільшення швидкості полімеризації на активних центрах. Це призводить до утворення пухких агломератів з розміром 10-50 мкм. Дані агломерати легко видаляються з поверхні електрода, утворюючи дрібнодисперсну суспензію. Таким чином методом електрохімічного осадження звичайно вдається отримати плівки з товщиною, не більшою декількох десятків мікрон.

Характерною рисою ЦВА плівок для всіх досліджуваних електропровідних полімерів є крута анодна хвиля на початку допування, за якою знаходиться полого плато. При зворотній розгортці потенціалу наприкінці плато з'являється катодна хвиля із зсувом потенціалу щодо анодної хвилі. Значення струму катодного піка менше значення струму анодного піка (при цьому площі анодної і катодної частин ЦВА однакові). Широке анодне плато на ЦВА зумовлене великою ємністю подвійного електричного шару (накопичення заряду на міжфазній межі “ електропровідний полімер – розчин ”).

Отримані значення опору отриманих плівок були перераховані в питомий опір та електропровідність (див. таблицю 1).

Таблиця 1. Значення питомого опору та електропровідності плівок

Кислота-допант	Питомий опір, Ом·см	Питома електропровідність, См/см
H ₂ SO ₄	0,17	6,01
HNO ₃	0,037	26,68
HCl	0,13	7,79
HClO ₄	6,86	0,15

Використання різних кислот в якості допантів впливає на електропровідність поліаніліну. Найменша електропровідність спостерігається для зразка допанта перхлоратної кислоти.

Висновки. Методом електрохімічного синтезу були отримані плівки поліаніліну з різними допантами. Електроосадження дозволяє отримувати електроди з контрольованою товщиною полімеру та уникнути переокислення плівки полімеру. Таким методом вдається отримати плівки з товщиною до декількох десятків мікрон. Досліджено, що використання різних допантів впливає на величину електропровідності плівок поліаніліну отриманих електролізом.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Ed. by T. Skotheim, J. Reynolds. Conducting polymers: theory, synthesis, properties, and characterization. Boca Raton, London, New-York: “CRC Press Taylor & Francis Group”. 2006. 532 p.
2. Aashutosh Dube, Shweta J. Malode, Abdullah N. Alodhayb, Kunal Mondal, Nagaraj P. Shetti. Conducting polymer-based electrochemical sensors: Progress, challenges, and future perspectives. *Talanta Open*. 2025. Vol. 11. P. 1-27.
3. Alex Palma-Cando, Ibeth Rendón-Enríquez, Michael Tausch, Ullrich Scherf. Thin Functional Polymer Films by Electropolymerization. *Nanomaterials*. 2019, 9(8), P. 11-25.
4. Shengxuan Lin, Qingping Wu, Yan Lu. Recent Progress of the Application of Electropolymerization in Batteries and Supercapacitors: Specific Design of Functions in Electrodes. *ChemElectroChem*. 2024. Vol.11. P. 1-10.
5. Jurgen Heinze, Bernardo A. Frontana-Uribe, Sabine Ludwigs Electrochemistry of Conducting Polymers-Persistent Models and New Concepts. *Chem. Review*. 2010. Vol. 10. P. 4724-4771.

2.15 НАЙПЕРСПЕКТИВНІШІ ТЕХНОЛОГІЇ НА ОСНОВІ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ В ХІМІЧНІЙ ПРОМИСЛОВОСТІ

Малишев В. В., Габ А. І.

Ліцей 209 «Сузір'я м. Києва», Україна
victor.malyshev.igic@gmail.com

Підприємства та установи хімічної промисловості все більше використовують штучний інтелект для бізнесу і наукових пошуків.

Аналіз ринку штучного інтелекту в хімічній промисловості проведено за такими сегментами: географічні регіони, тип розгортання, призначення витрат, застосування, призначення, кінцеве використання, перспективні технології.

Оцінено обсяги та динаміку світових ринків хімічної продукції (агрохімікатів, хімічної продукції, каталізаторів, спеціалізованих), обладнання (сенсорів, приладобудування), інтернету речей.

Ключові слова: *штучний інтелект, хімічна промисловість, сегментний аналіз, технології, технологічні рішення.*

Застосування штучного інтелекту (ШІ) – процес активного використання найсучасніших наукових досягнень у сфері інформатики в різноманітних галузях життєдіяльності суспільства. Стрімкий розвиток технологій неможливо уявити без інновацій ШІ у різних галузях [1, 2]. Серед 20 топ-застосувань ШІ відзначається все більше його інтегрування в освіту [3], медицину [4], різні галузі промисловості, зокрема, в хімічну. В майбутньому ШІ, безсумнівно, відіграватиме ще значнішу роль у формуванні багатьох секторів.

Аналіз наукових публікацій щодо ринку ШІ в хімічній промисловості [5-10] свідчить про значну інтеграцію технологій ШІ у процеси хімічного виробництва. Відомі «гравці» ринку, такі як IBM, NVIDIA та BASF, використовують ШІ для покращення розробки продуктів та оптимізації процесів, тим самим підвищуючи операційну ефективність та інновації. Відбуваються також злиття та поглинання компаній для посилення позицій на ринку, зокрема, у серпні 2023 року Microsoft придбала компанію з аналізу даних, що спеціалізується на рішеннях ШІ для хімічної промисловості, прагнучи посилити свої можливості в галузі ШІ в цьому секторі. Крім того, Accenture розширює свій портфель, співпрацюючи з Cargill, щоб використовувати ШІ у виробництві харчових продуктів та управлінні ланцюгами поставок.

Обсяги ринку зростають завдяки розвитку технологій ШІ, які оптимізують виробничі процеси та поліпшують прогнозне обслуговування, що зрештою позитивно вплине на прибутковість. Протягом останніх кількох років (з 2021 по 2023 рік) компанії Honeywell та Siemens досягли успіхів, інвестуючи значні кошти в ініціативи з досліджень та розробок у

сфері ШІ, зосереджені на сталому розвитку хімічної промисловості. Ця тенденція відображає прагнення світової спільноти впроваджувати технологічні інновації в хімічну промисловість для досягнення екологічного спрямованішого та ефективнішого хімічного виробництва.

Мета дослідження: систематизувати та узагальнити відомості щодо сегментного аналізу та найперспективніших технологій на ринку ШІ в хімічній промисловості.

Об'єкт дослідження: світовий ринок ШІ в хімічній промисловості.

Предмет дослідження: сегментний аналіз і технології світового ринку ШІ в хімічній промисловості.

Методи дослідження

Метод пошуку літературних даних з досліджуваної тематики; метод аналіз літературних джерел; контент-аналіз документів; метод систематизації та класифікації при проведенні дослідження щодо сегментації та технологій світового ринку ШІ в хімічній промисловості.

Результати дослідження

Обсяг ринку ШІ в хімічній промисловості за даними дослідження [11] оцінювався в 3,06 млрд. дол. США у 2023 році та в 3,49 млрд. дол. у 2024 році. Очікується його зростання до 15 млрд. дол. до 2035 року з середньорічним сукупним темпом зростання (ССТЗ) 14,17 % протягом прогнозованого періоду (2025-2035).

У 2024 році Північна Америка займала найбільшу частку світового ринку (39,4 %). Решті географічних регіонів відповідали такі частки ринку: Європа – 26,6 %, Азійсько-Тихоокеанський регіон – 24,8 %, Близький Схід та Африка – 5,1 %, Латинська Америка – 4,0 % [12].

Факторами домінування Північної Америки є такі:

- досягнення у машинному навчанні та прогнозній аналітиці;
- потреба у зниженні витрат та підвищенні ефективності хімічної галузі;
- зросла увага до екологічних норм та сталого розвитку;
- зрослий попит на персоналізовані товари та послуги.

Очікується, що протягом прогнозованого періоду ринок ШІ в хімічній галузі в Європі розвиватиметься найшвидшими темпами серед усіх географічних регіонів. Розширення європейського ринку зумовлено низкою динамічних причин:

- зросла потреба в ефективності та оптимізації процесів;
- впровадження рішень на основі ШІ через нормативні вимоги та проблеми сталого розвитку;
- впровадження технологій ШІ стимулюється зрослим акцентом європейської хімічної промисловості на інноваціях та конкуренції.

У 2024 році сегмент послуг лідирував на ринку з часткою доходу 40,3 % (обсяг сегменту становив 716,5 млн. дол.). Сегменти програмного забезпечення та обладнання мали частки 37,1 % (662,0 млн. дол.) та 22,6 % (403,0 млн. дол.) відповідно [12]. Значна частка сегменту програмного

забезпечення зумовлена пришвидшенням процесу проєктування хімічних речовин і виробництв завдяки використанню ШІ, машинного навчання та комп'ютерних обчислень в інструментах проєктування. Автоматизація проєктування та підвищення ефективності хімічного синтезу – дві переваги цієї технології. Очікується, що сегмент апаратного забезпечення зростатиме з найвищим ССТЗ протягом прогнозованого періоду через зростання потреби в спеціалізованих апаратних компонентах, таких як пам'ять та процесори ШІ, використанні алгоритмів ШІ для складних процедур.

Відповідно до сегментації за застосуванням у 2024 році усі використані сім сегментів мали частки доходу ринку в межах 9,1 -10,6 % [12].

Обсяги окремих сегментів у 2022 та 2024 роках та темпи їх зростання показано в табл. 1.

Таблиця 1. Обсяги сегментів застосування у 2022 та 2024 роках та темпи їх зростання [12]

Найменування застосування	2022 рік	2024 рік	Відсоток зростання
Відкриття нових матеріалів	114,2	189,4	66
Оптимізація виробництва	109,0	183,8	69
Оптимізація цін	109,0	181,8	67
Прогнозування завантаження сировини	106,8	177,6	66
Оптимізація продуктового портфоліо	101,3	167,8	66
Оптимізація сировини	98,2	163,7	67
Управління та контроль процесами	106,8	179,3	68
Інше	332,7	538,1	62

Сегмент винайдення нових матеріалів домінував на ринку завдяки можливостям технологій ШІ щодо зниження витрат, пошуку кращих хімічних характеристик, прискоренню виходу продуктів і технологій на ринок та забезпеченню відповідності продукту вимогам ринку з самого початку процесу його створення.

У сфері дослідження матеріалів автоматизовані, паралельні та ітеративні процедури, що функціонують на базі ШІ, моделювання та експериментальної автоматизації, доповнюють традиційну ручну та серійну працю, яка потребує від людини значних витрат часу. Очікується, що сегмент оптимізації продукції буде зростати з найвищим ССТЗ протягом прогнозованого періоду. Машинне навчання створює керовані даними моделі для хімічного виробництва, які визначають тенденції, прогнозують результати та оптимізують процедури.

Відповідно до сегментації ринку за призначенням (оптимізація процесів, прогнозне обслуговування, контроль якості, управління ланцюгом поставок) сегмент оптимізації процесів домінував на ринку і оцінювався в 1,05 млрд. дол. у 2024 році (частка доходу ринку становила

30,1 %) з прогнозованим зростанням до 5,0 млрд. дол. у 2035 році [11]. Оптимізація процесів забезпечує аналіз даних у реальному часі для вдосконалення хімічних процесів та зменшення відходів.

Прогнозоване технічне обслуговування оцінювалось в 0,9 млрд. дол. у 2024 році (частка сегменту становила 25,8 %) та, за прогнозами, воно досягне 4,2 млрд. дол. у 2035 році. Сегмент використовує ІІІ для прогнозування збоїв обладнання до їх виникнення, тим самим уникаючи дорогих простоїв та збільшуючи термін служби обладнання.

Сегмент контролю якості, який має вирішальне значення для дотримання нормативних стандартів, за прогнозами зросте з 1,0 млрд. дол. у 2024 році (частка ринку – 28,6 %) до 4,5 млрд. дол. у 2035 році, забезпечуючи стабільність та безпеку продукції завдяки передовим методам перевірки на основі ІІІ.

Сегмент управління ланцюгами поставок, оцінка якого починається з 0,54 млрд. дол. у 2024 році (частка ринку – 15,5 %) та, як очікується, зросте до 1,3 млрд. дол. у 2035 році. Він поліпшує управління запасами та прогнозування попиту, даючи змогу компаніям швидко реагувати на зміни ринку та знижувати операційні витрати.

В дослідженнях [5, 6, 9] ринок сегментовано ринку за перспективними технологіями (машинне навчання, обробка природної мови, автоматизація процесів робототехніки, глибоке навчання). Стрімке зростання ринку демонструє стійку траєкторію розвитку технологічних рішень у цьому секторі:

- ✓ ринок переживає значне зростання, що зумовлене зрослим попитом на автоматизацію та ухвалення рішень на основі даних у хімічній промисловості;
- ✓ машинне навчання відіграє вирішальну роль, оскільки воно дає змогу проводити прогнозну аналітику, яка оптимізує процеси, що призводить до підвищення ефективності та зниження витрат;
- ✓ важливе значення обробки природної мови, яка сприяє кращій комунікації між системами та операторами, оптимізуючи робочі процеси та підвищуючи загальну продуктивність;
- ✓ життєва важливість автоматизації процесів робототехніки стає незамінною для виконання повторюваних завдань, тим самим звільняючи людські ресурси для вирішення складніших завдань;
- ✓ важливість глибокого навчання, яке пропонує нові можливості моделювання, розширюючи можливості аналізу величезних наборів даних, що є важливим для інновацій у розробці продуктів.

Поєднання цих технологій формує синергетичний підхід, який суттєво трансформує операції на світовому ринку ІІІ в хімічній продукції, зрештою сприяючи загальному зростанню ринку. Оскільки ці технології продовжують розвиватися, вони надають широкі можливості для компаній, які прагнуть використовувати ІІІ для підвищення операційної ефективності та отримання стратегічних переваг.

На основі даних дослідження [12] можна узагальнити та систематизувати відомості щодо обсягів і динаміки окремих світових ринків хімічної продукції та обладнання (табл. 2).

Таблиця 2. Обсягі світових ринків продукції та обладнання хімічної промисловості

Назва ринку/продукції	Обсяг, млрд. дол. США		ССТЗ в період 2024-2034 років, %
Світовий ринок агрохімікатів	235,86	313,89	2,90
Світовий ринок хімічних сенсорів	24,94	55,36	8,30
Світовий ринок хімічної продукції та приладобудування	61,48	117,59	6,70
Світовий ринку хімічної продукції як послуги	10,28	22,10	7,91
Світового ринок хімічних катализаторів	41,29	64,04	4,48
Світовий ринок генеративного штучного інтелекту	323,58	3820,21	28,01
Світовий ринок Інтернет речей	84,72	299,51	13,46
Світовий ринок спеціальних хімікатів	904,45	1332,04	3,94
Світовий ринок хімії 4.0	87,52	237,53	10,50

За результатами узагальнення та систематизації видно, що за обсягами ринку провідні місця займали світові ринки спеціальних хімікатів, генеративного штучного інтелекту, агрохімікатів. Найшвидшими темпами будуть зростати світові ринки генеративного штучного інтелекту, Інтернет речей, хімії 4.0.

Висновки. Стрімкий розвиток технологій неможливо уявити без інновацій ШІ в різних галузях, зокрема, в хімічній промисловості. Обсяги світового ринку ШІ у хімічній промисловості зростають завдяки розвитку технологій ШІ, які оптимізують виробничі процеси та поліпшують прогнозне обслуговування, що зрештою позитивно вплине на прибутковість.

Ключові висновки щодо використання ШІ на ринку хімічних речовин у 2024 році: Північна Америка домінувала на ринку з часткою доходу 39,4 %; за кінцевим використанням сегмент послуг мав найбільшу частку ринку 40,22 %; за застосуванням сегмент базових хімікатів та нафтохімікатів мав найбільшу частку ринку 57,5 %; за застосуванням сегмент інше мав найбільшу частку ринку 30,20 %.

Стрімке зростання ринку демонструє стійку траєкторію розвитку технологічних рішень у цьому секторі: ринок переживає значне зростання; машинне навчання відіграє вирішальну роль; важливе значення обробки природної мови; життєва важливість автоматизації процесів робототехніки; важливість глибокого навчання.

Провідні місця серед світових ринків хімічної продукції та обладнання займали ринки спеціальних хімікатів, генеративного штучного інтелекту, агрохімікатів. Найшвидшими темпами будуть зростати світові ринки генеративного штучного інтелекту, Інтернет речей, хімії 4.0.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Artificial Intelligence in Society, OECD Publishing, Paris, 2019. (<https://doi.org/10.1787/eedfee77-en>)
2. Top 20 Applications of Artificial Intelligence (AI) in 2025. (<https://www.geeksforgeeks.org/applications-of-ai/>)
3. Malyshev V., Gab A., Shakhnin D., Lipsky Y. Research of the Global Higher Education Market and of the Use of Artificial Intelligence in this Field. EUREKA: Social and Humanities. 2024. No. 5. P. 28–41. (<https://doi.org/10.21303/2504-5571.2024.003663>)
4. Malyshev V., Lipskyi Y., Kovalenko V., Gab A., Shakhnin D., Orel O. Assessment of the Global Artificial Intelligence Market in Healthcare. Technology Audit and Production Reserves. 2024. No. 6/4 (80). P. 62–70. (<https://doi.org/10.15587/2706-5448.2024.316451>)
5. Ding H., Hua P., Huang Z. Survey on Recent Progress of AI for Chemistry: Methods, Applications, and Opportunities. arXiv:2502.17456v1 [physics.chem-ph] (<https://doi.org/10.48550/arXiv.2502.17456>)
6. Baum Z. J., Yu X., Ayala P. Y., Zhao Y., Watkins S. P., Zhou Q. Artificial Intelligence in Chemistry: Current Trends and Future Directions. J. Chem. Inf. Model. 2021. Vol. 61. Iss. 7. P. 3197–3212. (<https://doi.org/10.1021/acs.jcim.1c00619>)
7. Lin S., Krishnan V., Womack D. Optimizing the chemicals value chain with AI. IBM Institute for Business Value. 2020. 59035359USEN-00 (<https://www.ibm.com/thought-leadership/institute-business-value/report/chemicals-value-chain-ai>)
8. Laska M., Karwala I. Artificial intelligence in the chemical industry – risks and opportunities. Scientific Papers of Silesian University of Technology. Organization and Management Series. 2023. No. 172. P. 403-416. (<http://doi.org/10.29119/1641-3466.2023.172.25>)
9. How AI is transforming chemistry research. chemistryworld.com (<https://www.chemistryworld.com/research/how-ai-is-transforming-chemistry-research/4020650.article>)
10. Insights 2024: Attitudes toward AI. Elsevier. 2024. (<https://www.elsevier.com/insights/attitudes-toward-ai>)
11. Dhapte A. AI in Chemicals Market Research Report By Application (Process Optimization, Predictive Maintenance, Quality Control, Supply Chain Management), By Technology (Machine Learning, Natural Language Processing, Robotics Process Automation, Deep Learning), By End Use Industry (Petrochemical, Pharmaceutical, Agricultural Chemicals, Specialty Chemicals), By Deployment Type (On-Premises, Cloud-Based, Hybrid) and By Regional (North America, Europe, South America, Asia Pacific, Middle East and Africa) - Forecast to 2035. marketresearchfuture.com 2025. MRFR/ICT/20607-HCR (<https://www.marketresearchfuture.com/reports/ai-in-chemicals-market-22207>)
12. AI in Chemicals Market Size to Reach USD 28 Billion by 2034. globenewswire.com 2025. (<https://www.globenewswire.com/news-release/2025/02/20/3029322/0/en/AI-in-Chemicals-Market-Size-to-Reach-USD-28-Billion-by-2034.htm>)

2.16 ТЕНДЕНЦІЇ ТА МОЖЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ В ХІМІЧНІЙ ПРОМИСЛОВОСТІ

Малишев В. В., Габ А. І.

Ліцей 209 «Сузір'я м. Києва», Україна
viktor.malyshev.igic@gmail.com

ШІ знаходить застосування у хімічній промисловості завдяки: використанню прогностичної аналітики для передбачення можливих небезпек та проактивного їх зменшення; створенню реалістичного досвіду віртуальної реальності, що імітує небезпечні ситуації. Виокремлено фактори зростання ШІ на світовому ринку хімічної продукції: визначальна роль «зеленої хімії» для розвитку галузі хімічної промисловості; автоматизація хіміко-технологічних процесів; ефективне управління ланцюгом поставок. Визначено тенденції та можливості світового ринку.

Ключові слова: *штучний інтелект, хімічна промисловість, фактори зростання ринку, тенденції, можливості.*

Хімія є фундаментальною наукою, яка стимулює технологічні інновації, розкриваючи таємниці матерії та даючи змогу створювати новаторські матеріали. Традиційні хімічні дослідження часто стикаються зі значними проблемами, такими як трудомісткі процеси проб і помилок, складність моделювання молекулярних взаємодій і величезна кількість можливих комбінацій реакцій. Для прискорення хімічних досліджень зростає значення розгляду потенційних застосувань штучного інтелекту (ШІ) в галузі хімії [1]. У огляді [2] досліджено зростання та поширення публікацій з хімії, пов'язаних із ШІ, за останні два десятиліття. Обсяг публікацій як у журналах, так і в патентах різко зріс, особливо з 2015 року.

В роботі [3] відмічено, що понад 80 % керівників підприємств та установ хімічної промисловості, опитаних IBM, визнають, що ШІ останнім часом має величезний вплив на їхній бізнес та наукові пошуки. Сферами, в яких ШІ найчастіше впроваджується в цьому секторі, є дослідження та розвиток (74 %), виробництво (61 %), прогнозування та планування (47 %), управління ризиками (58 %). Згідно з опитуванням, проведеним Accenture [4], 94 % керівного персоналу хімічної промисловості та індустрії сучасних матеріалів очікують оцифрування усієї галузі за допомогою ШІ.

В дослідженні [5] відмічено, що проточні хімічні процеси є сприятливою технологією для автоматизованого синтезу й ШІ є потужним інструментом у різних сферах цього напрямку, включаючи технологію аналізу процесу та оптимізацію реакції синтезу. Поєднання хімії безперервного потоку та ШІ стимулює розвиток хімічного виробництва. В дослідженні [6] повідомляється, що розроблена за допомогою ШІ система зможе визначити кожен можливу реакцію із заданим набором матеріалів. На ШІ не впливає обмеження традиційної освіти в галузі хімії та наукової інтуїції. Також робот-хімік може

спокійно працювати зі сполуками, які небезпечні для людини, та передбачати неперевірені реакції з точністю понад 80 %.

Мета дослідження: систематизація й узагальнення відомостей щодо динаміки, тенденцій і можливостей світового ринку штучного інтелекту в хімічній промисловості.

Об'єкт дослідження: світовий ринок штучного інтелекту в хімічній промисловості.

Предмет дослідження: динаміка, можливості й перспективи світового ринку штучного інтелекту в хімічній промисловості.

Методи дослідження

Метод пошуку літературних даних з досліджуваної тематики; метод аналіз літературних джерел; контент-аналіз документів; метод систематизації та класифікації при проведенні дослідження щодо світового ринку штучного інтелекту в хімічній промисловості.

Результати дослідження

Світовий ринок ШІ в хімічній промисловості у 2024 році становив 1,78 млрд. дол. США і оцінюється в 2,29 млрд. дол. у 2025 році. Прогнозується, що він досягне приблизно 28 млрд. дол. до 2034 року, зростаючи з середньорічним сукупним темпом зростання (ССТЗ) 32,05 % у період з 2025 по 2034 рік. Обсяг ринку ШІ в хімічній промисловості Північної Америки у 2024 році становив 701,9 млрд. дол. та буде зростати з ССТЗ 31,01 % протягом прогнозованого періоду [7]. Інтеграція ШІ в галузі, які працюють з хімічними речовинами, є вирішальним кроком в оптимізації різних процесів, що зумовлює зростання ринку. Штучний інтелект все більше застосовують у хімічній промисловості завдяки:

- використанню прогнозної аналітики для передбачення можливих небезпек та проактивного їх зменшення – ШІ пропонує революційні рішення з вирішенням проблеми методами машинного навчання, особливо за допомогою моделей навчання з учителем; для передбачення збоїв у майбутньому ШІ у хімічному секторі може бути навчений з використанням життєво важливих даних виробничих потужностей щодо можливого виникнення аварій;

- створенню реалістичного досвіду віртуальної реальності, що імітує небезпечні ситуації – ШІ має потенціал повністю трансформувати навчання з безпеки; доповнена реальність використовується для навчання робочої сили та зменшення ймовірності катастроф, а симуляції на основі ШІ можуть забезпечити віртуальне тестування процедур безпеки та планів реагування на надзвичайні ситуації.

Узагальнення результатів досліджень [1-4, 7] дозволяє виокремити фактори зростання ШІ на світовому ринку хімічної продукції:

- визначальна роль «зеленої хімії» для розвитку галузі хімічної промисловості – у сфері зеленої хімії, де основна увага приділяється створенню технологій і продуктів, що зменшують або повністю виключають використання й виробництво небезпечних матеріалів, ШІ стимулює відповідні інновації; дослідники можуть визначати умови

здійснення реакцій, які оптимізують вихід кінцевого продукту, одночасно зменшуючи відходи та споживання енергії, використовуючи прогнозне моделювання на основі ІІІ;

- автоматизація хіміко-технологічних процесів – ІІІ допомагає створювати платформи для автономного хімічного синтезу, в яких роботизовані системи можуть виконувати складні операції синтезу з мінімальною участю з боку людини; ці платформи використовують алгоритми ІІІ для моніторингу процесу реагування в режимі реального часу та планування й виконання «маршруту» синтезу;

- ефективне управління ланцюгом поставок – хімічна промисловість значною мірою залежить від ефективного управління ланцюгом поставок для зменшення втрат ресурсів; прогнозування попиту, транспортна логістика та управління запасами покращуються завдяки аналітиці на основі ІІІ.

На світовому ринку ІІІ в хімічній промисловості спостерігається кілька важливих тенденцій, які формують його майбутнє:

- визначним рушійним фактором ринку є зростання поштовх до цифрової трансформації в хімічній промисловості – компанії впроваджують технології ІІІ для підвищення ефективності процесів, поліпшення розробки продуктів та мінімізації операційних витрат;

- потреба в більш сталих та екологічно чистих практиках – уряди країн усього світу наголошують на важливості сталого розвитку в хімічному виробництві;

- можливість ухвалення обґрунтованих рішень – зростання можливостей аналізу даних та машинного навчання дає змогу організаціям ухвалювати обґрунтовані рішення.

Можливості на світовому ринку ІІІ в хімічній промисловості численні, особливо у сфері прогнозного обслуговування та оптимізації ланцюгів поставок. Серед них можна виділити основні:

- використовуючи алгоритми ІІІ, компанії можуть покращити свої можливості прогнозу аналітики, що призведе до скорочення простоїв та підвищення операційної ефективності;

- розробка рецептур та матеріалів, які динамічно реагують на змінні умови, задовольняючи таким чином потреби в більш просунутих застосуваннях у різних секторах;

- зросла увага до співпраці між постачальниками технологій та виробниками хімічної продукції, що підвищує дослідницькі та розробницькі зусилля та призводить до інноваційних рішень, адаптованих до певних хімічних застосувань;

- зростання інтересу до інтеграції ІІІ з іншими новими технологіями, такими як Інтернет речей та блокчейн, що призводить до створення синергії, яка може трансформувати операції в галузі;

- зацікавленість дослідників і виробників у виявленні тенденцій та можливостей для сприяння зростанню ринку та інноваціям.

ІІІ революціонізує дослідницький ландшафт, відкриваючи величезні можливості для прискорення здійснення відкриттів, поліпшення співпраці та вирішення критичних завдань у різних галузях. Він уже продемонстрував свою свої можливості та перспективи у просуванні хімічних досліджень. Від винайдення ліків до матеріалознавства, реальні програми показують, як ці інструменти змінюють спосіб роботи хіміків [8-10]:

- прискорення винайдення ліків – ключова роль ІІІ у прогнозуванні молекулярних взаємодій дозволяє значно скорочувати час, необхідний для виявлення життєздатних «кандидатів» на ліки (наприклад, прогнозне моделювання, допомогло дослідникам змодельовати хімічні реакції та визначити пріоритетність перспективних сполук без масштабних лабораторних досліджень, це скоротило терміни розробки ліків на ранній стадії до 30 %);

- розробка екологічно чистих матеріалів – використання ІІІ для розробки передових матеріалів із певними властивостями, такими як довговічність або екологічність (наприклад, застосування алгоритмів машинного навчання для передбачення поведінки різних молекулярних конфігурацій дає змогу створювати біорозкладані полімери швидше, ніж традиційні методи проб і помилок);

- виявлення прихованих закономірностей – використовуючи величезні набори даних хімічної літератури та експериментальних результатів, ІІІ виявив тенденції та кореляції, які інакше могли б залишитися непоміченими (наприклад, використання ІІІ для аналізу даних про хімічні реакції за тривалий період виявляє оптимізовані шляхи для ефективнішого синтезу складних молекул);

- підвищення ефективності функціонування лабораторій – автоматизація на основі ІІІ оптимізувала рутинні, але трудомісткі процеси, такі як аналіз даних спектроскопії або сортування тисяч хімічних рефератів; це дозволяє зосередитися на високоцінних інноваційних завданнях, делегуючи повторювану роботу системам ІІІ.

Ці зміни способів роботи та приклади демонструють, як інструменти ІІІ не тільки прискорюють робочі процеси, але й забезпечують прориви, які раніше були недоступні. Для осіб, які ухвалюють рішення, це підкреслює важливість інвестування в підходи, керовані ІІІ, що відповідають цілям інституційних досліджень.

Висновки. ІІІ знаходить застосування у хімічній промисловості завдяки: використанню прогнозової аналітики для передбачення можливих небезпек та проактивного їх зменшення; створенню реалістичного досвіду віртуальної реальності, що імітує небезпечні ситуації. Факторами зростання ІІІ на світовому ринку хімічної продукції є: визначальна роль «зеленої хімії» для розвитку галузі хімічної промисловості; автоматизація хіміко-технологічних процесів; ефективне управління ланцюгом поставок.

Важливими тенденціями формування майбутнього ринку є: визначним рушійним фактором ринку є зростаючий вплив до цифрової трансформації в

хімічній промисловості; потреба в більш сталих та екологічно чистих практиках; можливість ухвалення обґрунтованих рішень.

Основні можливості на світовому ринку ШІ в хімічній промисловості: покращення можливостей прогнозу аналітики; розробка нових рецептур та матеріалів; зросла увага до співпраці між постачальниками технологій та виробниками хімічної продукції; зростання інтересу до інтеграції ШІ з іншими новими технологіями, такими як Інтернет речей та блокчейн; зацікавленість дослідників і виробників у виявленні тенденцій та можливостей для сприяння зростанню ринку та інноваціям.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Ding H., Hua P., Huang Z. Survey on Recent Progress of AI for Chemistry: Methods, Applications, and Opportunities. arXiv:2502.17456v1 [physics.chem-ph] (<https://doi.org/10.48550/arXiv.2502.17456>)
2. Baum Z. J., Yu X., Ayala P. Y., Zhao Y., Watkins S. P., Zhou Q. Artificial Intelligence in Chemistry: Current Trends and Future Directions. *J. Chem. Inf. Model.* 2021. Vol. 61. Iss. 7. P. 3197–3212. (<https://doi.org/10.1021/acs.jcim.1c00619>)
3. Lin S., Krishnan V., Womack D. Optimizing the chemicals value chain with AI. IBM Institute for Business Value. 2020. 59035359USEN-00 (<https://www.ibm.com/thought-leadership/institute-business-value/report/chemicals-value-chain-ai>)
4. Laska M., Karwala I. Artificial intelligence in the chemical industry – risks and opportunities. *Scientific Papers of Silesian University of Technology. Organization and Management Series.* 2023. No. 172. P. 403-416. (<http://doi.org/10.29119/1641-3466.2023.172.25>)
5. Shen R., Su W. Review of the Applications of AI in the Process Analysis and Optimization of Chemical Products. *Pharmaceutical Fronts.* 2023. Vol. 5. No. 4. e219. (<https://doi.org/10.1055/s-0043-1777425>)
6. Roles of generative AI in drug discovery: advantages, case studies, and examples. *geeksforsci.com* 2024. (<https://www.geeksforsci.com/roles-of-generative-ai-in-drug-discovery-advantages-case-studies-and-examples/>)
7. AI in Chemicals Market Size to Reach USD 28 Billion by 2034. *globenewswire.com* 2025. (<https://www.globenewswire.com/news-release/2025/02/20/3029322/0/en/AI-in-Chemicals-Market-Size-to-Rreach-USD-28-Billion-by-2034.htm>)
8. Granda J. M., Donina L., Dragone V., Long D.-L., Cronin L. Controlling an organic synthesis robot with machine learning to search for new reactivity. *Nature.* 2018. Vol. 559. P. 377–381. (<https://doi.org/10.1038/s41586-018-0307-8>)
9. Dabas R. Twenty ways AI is advancing chemistry. *Chemistry World*, 2024. (<https://www.chemistryworld.com/news/twenty-ways-ai-is-advancing-chemistry/4020269.article>)
10. Dhudum R., Ganeshpurkar A., Pawar A. Revolutionizing Drug Discovery: A Comprehensive Review of AI Applications. *Drugs Drug Candidates.* 2024. Vol. 3. P. 148-171. (<https://doi.org/10.3390/ddc3010009>)

2.17 ХРОМОЩАДНЕ ФОРМУВАННЯ ЕЛАСТИЧНОЇ ШКІРИ

Данилкович А. Г., Охмат О. А.

Київський національний університет технологій та дизайну,
ag101@ukr.net, otalan@ukr.net

Розглянуто колоїдно-хімічні особливості процесів хромового дублення шкіряного напівфабрикату при виготовленні шкір різного призначення з використанням широкого асортименту допоміжних реагентів. Встановлено суттєве зменшення витрат сполук хрому в розглянутих технологіях. При цьому досягається необхідна гідротермічна стійкість напівфабрикату зі зменшенням вмісту сполук хрому у відпрацьованих розчинах. Отримані шкіри за комплексом властивостей відповідають нормативним вимогам.

Ключові слова: *шкіряний напівфабрикат, хромощадне дублення, витрати сполук хрому.*

Виробництво еластичної шкіри хромового дублення пов'язано з обробленням шкур тварин з використанням значної кількості технологічних реагентів різного хімічного складу і, насамперед, сполук хрому. За існуючими технологіями з використанням сполук хрому виробляється близько 90 % [1] світового об'єму шкіри при їх щорічній потребі $4 \cdot 10^6$ тон. Незважаючи на значну токсичність сполук хрому ефективність їх використання складає 40–70 % [2]. Враховуючи це, важливою проблемою є мінімізація витрат сполук хрому при розробленні нових технологій та зниження їх техногенності. Одним із шляхів вирішення цієї проблеми є регульоване підвищення реакційної здатності колагену дерми, вміст якого досягає 95 % [3]. При цьому мінімізація використання сполук хрому реалізується як шляхом використання допоміжних ефективних реагентів, так і оптимізації умов взаємодії сполук хрому з колагеном.

Метою роботи є формування еластичного напівфабрикату в дубильно-додублювальних процесах при мінімальній витраті сполук хрому. Об'єкт дослідження – процеси хромового дублення та додублювання з мінімізацією витрат сполук хрому. Предмет дослідження – фізико-хімічні властивості дубленого та додубленого напівфабрикату.

Особливості структури колагену та його взаємодія зі сполуками хрому

В процесі виготовлення шкіряних матеріалів проводяться цілеспрямовані структури перетворення колагену дерми з врахуванням його фізико-хімічних властивостей. Колаген дерми характеризується складною ієрархічною структурою, що включає поліпептидні ланцюги, макромолекули, мікрофібрил, фібрили, елементарні волокна та пучки волокон [4]. При цьому поліпептидні ланцюги $\alpha 1$ і $\alpha 2$ основного колагену шкур тварин першого типу

[4, 5] з молекулярними масами близько 100 кДа відрізняються послідовністю амінокислотних залишків -Gly-X-Y-, де X, Y – залишки будь-якої α -амінокислоти, крім гліцину. Ці амінокислотні залишки мають такий мольний склад: кислотного і основного характеру відповідно – 12,38 і 8,96; з гідроксильними групами без оксипроліну – 13,54; з вуглеводневим радикалом – 31,48; з іміногрупою – 21,40; сірковмісні – 0,70. Макромолекули діаметром 1,5 нм, довжиною 300 нм утворюються трьома закрученими вліво α -ланцюгами $[\alpha 1(I)]_2\alpha 2(I)$. Мікрофібрили середнім діаметром 3–5 нм складаються з п'яти макромолекул закручених праворуч в спіраль з періодом 87 нм [6], що зв'язані ковалентними зв'язками за допомогою неспіралізованих кінців. Водночас макромолекули в мікрофібрилі поздовжньо зміщені на 67 нм. Фібрили діаметром 50–200 нм, містять 900–2000 мікрофібрил. Елементарні волокна діаметром $5 \cdot 10^3$ нм утворені 900–1000 фібрилами. Пучки волокон діаметром $0,2 \cdot 10^6$ складаються з 30–300 елементарних волокон довжиною 25–111 мм [7] з кутом нахилу до поверхні шкіри. При цьому кут їх нахилу зменшується від 70° до 5° зі зниженням щільності шкіри від хребтової лінії до пол і пахвин.

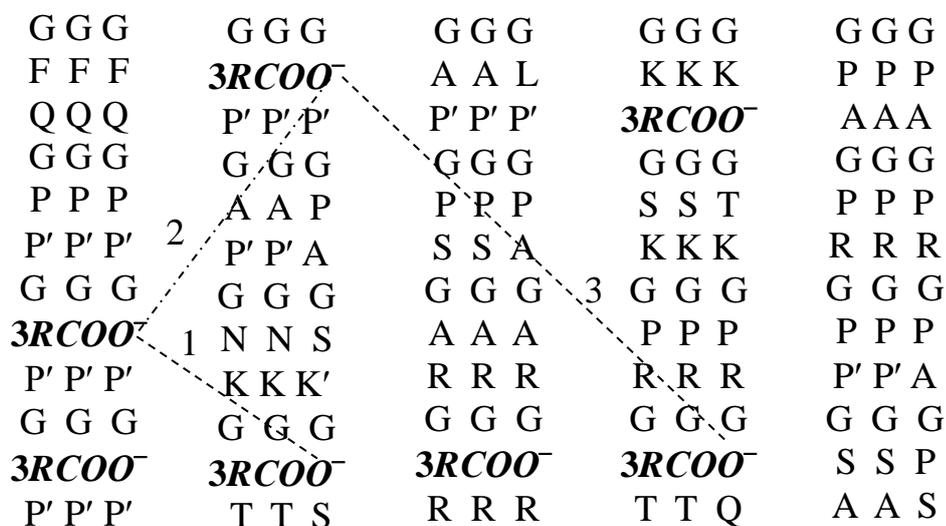
Структура колагену дерми включає гідрофільні та гідрофобні ділянки, утворені відповідно амінокислотними залишками кислотного і основного характеру та неполярними амінокислотними залишками у тріадах яких розташовані пролін і гідроксипролін. При цьому полярні та неполярні ділянки відповідають аморфній і кристалічній структурі, що містять по 5–10 амінокислотних залишків. Слід зауважити, що для всіх технологічних оброблень колагенвмісної сировини необхідно створювати умови активної взаємодії реагентів на макромолекулярному рівні.

Використання сполук хрому в технології виготовлення еластичної шкіри обумовлено необхідністю отримання шкіряних матеріалів зі специфічним комплексом пружно-пластичних властивостей, необхідних для виготовлення і експлуатації шкіряних виробів [8]. Мінімізація витрат сполук хрому відбувається частковою заміною іншими мінеральними сполуками. Зокрема, для цього використовуються сполуки кремнію, титану, алюмінію тощо [9, 10]. У цьому відношенні важливим є розроблення та суттєве удосконалення хромошадних технологій, що передбачає використання математичного моделювання та багатопараметричної оптимізації технологічного процесу [11].

Особливістю колоїдно-хімічної взаємодії комплексних сполук хрому з колагеном дерми, в якому міжмолекулярні відстані при обводненні збільшуються до 0,6–0,8 нм [7], а міжфібрилярні – до 2,7 нм [12], при розчиненні технологічного реагенту наведено на рис. 1 [13].

З рисунка видно, що хромові комплекси (ХК) з макромолекулами мікрофібрил колагену (ММК) можуть утворювати хімічні зв'язки різної довжини. Зокрема, із суміжними ММК, розташованими на одному рівні чи тріадах поряд – тип-1, через одну тріаду – тип-2, через ММК та дві тріади – тип-3. Такі зв'язки можуть утворюватись при взаємодії ХК з карбоксильними групами колагену різних макромолекул мікрофібрили. При цьому спочатку

утворюються хімічні зв'язки типу 1. За збільшення розміру ХК при регульованому підвищенні рН розчину утворюються зв'язки типів 2 та 3. У таблиці 1 наведена розрахована кількість утворених зовнішньо- і внутрішньомікрофібрилярних зв'язків. При цьому прийнято до уваги, що кількість карбоксильних груп в об'ємі мікрофібрил 1D становить 226. Водночас кількість утворених зв'язків першого типу відповідає 61 %, другого – 73 %. Це можна пояснити більш вигідним геометричним розташуванням карбоксильних груп для утворення зв'язків другого типу. Фактично останніх може бути менше порівняно зі зв'язками типу 1, оскільки зв'язки більшої довжини утворюються після підвищення рН середовища для прискорення структурування колагену дерми. Практично активно взаємодіють з колагеном дерми 60–65 % карбоксильних груп.



Примітка. Позначення амінокислот за Міжнародним союзом фундаментальної та прикладної хімії: гліцин – G, фенілаланін – F, глутамінова кислота – E, аланін – A, лейцин – L, лізин – K, пролін – P, глутамін – Q, гідроксипролін – P', серин – S, аргінін – R, аспарагін – N, гідроксилізин – K', аспарагінова кислота – D, треонін – T

Рис. 1. Можливі взаємодії комплексів хрому з макромолекулами мікрофібрили колагену

Таблиця 1. Кількість можливих зв'язків хромових комплексів у 1D об'ємі мікрофібрили колагену

Тип зв'язку	Відстань, нм	Кількість зв'язків	
		внутрішніх	зовнішніх
1	0,6...0,8	27	42
2	понад 0,8 до 1,4 вкл.	29	54
3	понад 1,4	27	45

Ефективність взаємодії хромових комплексів з колагеном дерми і ступінь їх структурування наведено в табл. 2. З наведених даних видно, що на активність взаємодії впливає підвищення основності ХК та їх кількість. При цьому на першій стадії взаємодії ХК з колагеном дерми домінуючий вплив на цей процес виявляє основність комплексів. Водночас температура

гідротермічної стійкості (T_{zc}) напівфабрикату при його структуруванні досягає максимуму через 12 год після підвищення ядерності комплексів.

Таблиця 2. Вплив хромових комплексів на термічні властивості колагену дерми

Хромові комплекси		Cr_2O_3 у напівфабрикаті, %	T_{zc} напівфабрикату, °C	
Cr_2O_3 , % маси зеленого напівфабрикату	Основність, %		після стабілізації	через 12 год
1,1	34,0	3,47	101,0	105,0
1,2	42,0	3,78	104,0	107,0
1,3	34,0	4,12	107,0	111,0
1,3	26,0	4,89	106,0	113,0

Отже, отримані дані дають підстави визначити умови активної взаємодії хромових комплексів з колагеном дерми та встановити їх витрати при формуванні напівфабрикату хромового дублення.

Мінімізація витрат сполук хрому при формуванні еластичної шкіри

Ефективне використання сполук хрому при формуванні еластичних шкір досягається шляхом повторного використання дубильних розчинів [14, 15]. При використанні суміші 0,5 % алюмінієвого синтану з 6 % основного сульфату хрому маси напівфабрикату [14] досягається відпрацювання сполук хрому понад 90 %. При цьому використано пікелювання напівфабрикату сульфатом натрію з додаванням форміату натрію за регулювання рН сірчаною кислотою до 3,0–3,5. Завершується процес дублення напівфабрикату при рН робочого розчину 4,0–4,2. Отримана шкіра вет-блуд має необхідну гідротермічну стійкість. Відпрацьований розчин після пікелювання сірчаною кислотою використовується повторно. Такий метод дублення забезпечує поглинання сполук хрому на 20 % вище порівняно з традиційним методом дублення. Економічна ефективність розробленої технології була встановлена шляхом її апробації на шкіряних заводах [16].

За методом двоступеневого дублення [17] напівфабрикат оброблять основним сульфатом хрому з витратою 10 % його маси. У подальшому відпрацьований дубильний розчин використовується для пікелювання нової партії напівфабрикату. Слід зауважити, що 50 % сполук хрому поглинається уже на першій стадії технологічного процесу. Цей розчин доводиться до початкового 10 % вмісту основного сульфату хрому. За цією технологією концентрація відпрацьованого розчину знижується у 70–100 раз порівняно з традиційною технологією. Двоступенева технологія дублення підвищує раціональне використання сполук хрому на 26–44 %. При цьому за 10 циклів реалізації технології досягається 25–30 % економія сполук хрому.

У роботі [15] наведені три варіанти хромового дублення напівфабрикату великої рогатої худоби (ВРХ) товщиною 3,0 мм, в яких використано хромовий дубитель Chromosal В. Для дослідження впливу

пікелювання на ефект дублення обрані сульфоароматичні кислоти різного хімічного складу з молярними співвідношеннями сульфованого фенолу : формальдегіду : анілін-2,5-дисульфонової кислоти на рівнях 1:1:1, 1:1.5:1.5, 1:2:2, відповідно А, В, С (табл. 3). Ці кислоти характеризувались середнім вмістом трьох, чотирьох та п'яти сульфонових груп. При чому структура В відповідає суміші А та С.

Знезолений напівфабрикат при витраті води 100 % обробляли різними сульфоароматичними кислотами за кінцевого рН 2,5. Потім у систему додавали 6 % дубителя Chromosal В. Через 4 год при досягненні наскрізного профарбування зрізу технологічний розчин підлужували до рН 4,2 і процес дублення продовжували ще протягом 2 год за температури 40 °С з наступним витримуванням напівфабрикату 10–12 год. За традиційним пікелюванням використано, мас. % зеленого напівфабрикату: хлориду натрію 6, мурашиної кислоти 1.2, сірчаної кислоти 0.9.

За низького рН сульфоароматичні кислоти стримували бубнявіння кислого напівфабрикату, а при дубленні підвищували поглинання напівфабрикатом сполук хрому. Водночас зменшено у 3,2 рази залишковий хром у відпрацьованому розчині. Це пояснюється ефективним екрануванням сульфононими групами позитивного заряду амінокислот колагену. При цьому вміст сполук хрому у внутрішньому шарі напівфабрикату помітно підвищується, особливо при використанні сульфоароматичної кислоти (САК) марки С, тому в подальшому експерименти будуть продовжені з її використанням.

Таблиця 3. Вплив пікелювання сульфоароматичними кислотами на хромове дублення

Пікелювання	Витрати кислоти, %	Cr у відпрацьованому розчині, мг/л	Зміна товщини напівфабрикату ΔT , %	T_{sc} напівфабрикату, °С
САК А	6.0	540.3	10	109.7
САК В	5.0	482.6	11	110.2
САК С	4.5	384.7	13	115.9
Традиційне	2.1	1,235.5	12	118.1

Примітка. ΔT , % = (товщина вичищеного напівфабрикату – товщина пікельованого напівфабрикату) \times 100 / товщина пікельованого напівфабрикату.

Для оцінки впливу пікелювання з різною витратою сульфоароматичної кислоти С було зафіксовано час дифузії сполук хрому в напівфабрикат (табл. 4). З наведених даних видно, що при витраті САК 1,0 % маси напівфабрикату сполуки хрому дифундують у напівфабрикат у 1,5 рази швидше порівняно з традиційним методом дублення. Водночас зі зменшенням витрат САК знижується вміст сполук хрому у відпрацьованому розчині. При цьому вміст сполук хрому в напівфабрикаті перевищує їх в зразках, отриманих за традиційним дубленням. Отже, застосування сульфоароматичної кислоти в процесі пікелювання дозволяє повністю виключити хлорид натрію з технологічного процесу хромового дублення

Таблиця 4. Вплив витрати сульфоароматичної кислоти С на хромове дублення

Пікелювання	pH пікелювання	Час дифузії сполук хрому, хв	pH підлужування	Вміст Cr у відпрацьованому розчині, мг/л
САК С 4.0 %	2.74	70	3.99	352.5
Також 2.5 %	3.26	70	4.02	244.6
– « – 1.0 %	4.52	60	4.01	126.4
Традиційний	2.51	90	4.00	1,195.5

Для встановлення раціонального використання сполук хрому при безсолевому дубленні з одним % САК С pH технологічного розчину доводили до 4.5, а Chromosal В додавали відповідно в кількості 6.5, 5.0, 3.5 % маси напівфабрикату. Результати впливу витрат дубителя на ефективність його використання наведено в табл. 5.

Таблиця 5. Вплив витрат дубителя на ефективність його використання при безсолевому пікелюванні 1,0 % сульфоароматичної кислоти марки С

Пікелювання	pH пікелювання	Chromosal В (Cr ₂ O ₃), %	pH підлужування	Cr ₂ O ₃		T _{zc} напівфабрикату, °С
				у стічних водах, мг/л	поглинання, %	
САК С 1.0 %	4.51	6.5 (1.69)	4.18	150.6	97.4	118.9
Також	4.53	5.0 (1.30)	4.23	98.6	98.1	119.2
– « –	4.50	3.5 (0.91)	4.19	45.1	98.6	120.1
Традиційне	2.52	6.0 (1.56)	4.25	1,209.5	71.6	116.9

З таблиці 5 видно, що зі зменшенням витрат Chromosal В вміст оксиду хрому в стічних водах знижується. При цьому поглинання дубителя напівфабрикатом досягає 98,6 %, а гідротермічна стійкість – 120,0 °С. фізико-механічні властивості отриманої шкіри за розробленою технологією наведено в табл. 6.

З наведених даних видно, що всі фізико-механічні властивості шкіри, отримані з використанням САК С переважають зразки, отримані за традиційним способом дублення при суттєво менших витратах сполук хрому. За органолептичною оцінкою отримані шкіри не відрізнялись від шкіри традиційного дублення.

Отже, розроблена технологія безсолевого дублення з використанням сульфоароматичної кислоти марки С забезпечує отримання якісної шкіри при зменшених витратах сполук хрому на 47 %. Це дає підстави розглядати таку технологію як техногенно безпечну та екологічно перспективну.

Мінімізація витрат сполук хрому при формуванні еластичних шкір досягалась шляхом часткової їх заміни хімічними реагентами органічної природи різного хімічного складу. Це дозволило підвищити ступінь поглинання дубителя у відпрацьованих розчинах. Зокрема, при використанні

похідної природного полісахариду хітину – хітозану процес дублення проводили після пікелювання голини. Хітозан додавали на завершальній стадії пікелювання голини [18] з витратами 0,5–4,0 % у виді мурашинокислого розчину. Всі технологічні процеси проводили при перемішуванні реакційної системи. Процес пікелювання виконували з витратами 5 % хлориду натрію і 0,8 % мурашиної кислоти маси зеленої голини та 100 % води при температурі 20–22 °С. На відпрацьований розчин додавали 2,0–4,0 % хромового дубителя. Після наскрізного профарбування голини реакційну систему підлужували до рН 4,0 1,5–2,0 % формиату і бікарбонату натрію. Дублення тривало 6–8 годин. У контрольному варіанті використано тільки сполуки хрому з витратою 6,0 % маси голини.

Таблиця 6. Фізико-механічні властивості шкіряного красту, дубленого з різною витратою Chromosal B

Пікелювання	Chromosal B (Cr ₂ O ₃), %	Міцність при		Подовження при розриві, %	Міцність на продавлювання, Н/мм	Висота розриву, мм
		розриванні Н/мм	роздиранні Н/мм ²			
САК С 1.0%	6.5 (1.69)	86	16	74	361	8.5
Також	5.0 (1.30)	83	17	70	354	8.9
– « –	3.5 (0.91)	85	17	71	365	9.1
Традиційне	6.0 (1.56)	76	12	65	301	7.1

Ефективність використання хітозану суттєво залежить як від його вмісту в системі, так і від витрат сполук хрому. При цьому найвища ефективність хітозану проявляється при витратах сполук хрому 2 % маси голини. Це відповідає найбільшому вмісту хрому в шкірі та найнижчій їх концентрації у відпрацьованому розчині. Цей ефект можна пояснити взаємодією сполук хрому як з колагеном, так і з хітозаном. За витрати хітозану 2 % маси голини сполуки хрому забезпечують комплекс необхідних пружно-пластичних властивостей шкіри при її вищій на 5 °С T_{sc} і меншій витраті сполук хрому у три рази. Разом з тим, поглинання сполук хрому з розчину є вищим порівняно з контрольним варіантом дублення.

Отже, витрати хітозану 2 % маси голини забезпечують високі дубильні властивості сполук хрому, завдяки чому реалізується ефективність процесу формування підкладкової шкіри.

При розробленні технологій формування протезної шкіри зменшення витрат сполук хрому досягнуто шляхом використання глутарового альдегіду і сполук алюмінію [9]. Недвоєну голину ВРХ пікелювали з використанням хлориду натрію і сірчаної кислоти відповідно 6,0 та 0,8 % зеленої маси голини і додавали 0,3 % мурашиної кислоти при 100 % витраті води та рН 2,8–2,9. Через 20 хв у систему додавали глутаровий альдегід і пікелювання продовжували ще дві години. Потім на відпрацьований розчин дозували сухий хромовий дубитель, а через 6 год дублення додавали алюмінієві галуни

(1,0 % у перерахунку на Al_2O_3) і дублення продовжували ще дві години. Потім підвищували рН технологічного розчину оксазолідином до 4,0, а через дві год вимірювали T_{zc} .

Процес альдегід-хром-алюмінієвого дублення був оптимізований [9, 19] з використанням функції бажаності Харрінгтона на основі отриманих математичних моделей за центральним композиційним планом другого порядку. При цьому витрати реагентів у розрахунку на активну речовину змінювались в інтервалах: $0,1 < \text{глутаровий альдегід} < 15,9$; $0,1 < \text{основний сульфат хрому} < 5,9$; $0,1 < \text{алюмінієві галуни} < 19,9$. Встановлена оптимальна витрата дубильних сполук для отримання шкіри з необхідними пружно-пластичними властивостями, що становлять, % маси голини: глутарового альдегіду – 6,2 активної речовини; сполук хрому – 0,75 Cr_2O_3 ; алюмінієвих галунів – 1,0 Al_2O_3 .

Особливості альдегід-хром-алюмінієвого дублення недвоєного напівфабрикату ВРХ за оптимізованою технологією забезпечують отримання якісної протезної шкіри при зменшеній витраті сполук хрому порівняно з типовою технологією [9] більше ніж удвічі. Слід зауважити, що використання глутарового альдегіду і сполук алюмінію в процесі дублення сприяє підвищенню стійкості отриманої шкіри до дії поту [20]. Така технологія може бути реалізована для виробництва ортопедичної шкіри.

Використання сполук фосфонію в процесі дублення голини шкур овець із застосуванням тетракісгідроксиметилфосфонію сульфат (ТНПС) [21] дає можливість підвищити бактерицидні властивості і стійкість до дії поту та мікроорганізмів отриманої шкіри. Сполуки ТНПС в кількості 1–5 % маси голини додавали у пікельний розчин при температурі 20–22 °С. Через дві год розчин підлужували до рН 5,2–5,5. Оптимальні витрати сполук фосфонію встановлені на рівні 2,0 % маси голини і це забезпечило отримання необхідних фізико-хімічних властивостей шкіри. У подальшому напівфабрикат дубили сполуками хрому при витратах 0,5 і 1,0 % Cr_2O_3 маси голини двома способами [22]. За першим способом сполуки хрому додавали у розчин після оброблення голини сполукою ТНПС. Підлужування системи до рН 3,8–4,2 здійснювали при завершенні процесу дублення (досліди 1–3). За другим способом дублення сполуками хрому голини виконували на новому розчині. При цьому фосфонієве дублення завершували при рН 5,2–5,5 (варіанти 4–6). Результати дублення голини шкур овець наведено в табл. 7.

З наведених даних видно, що варіанти способу 2 є ефективнішими за сумісне дублення. При цьому T_{zc} отриманих зразків на 3–5 °С є вищою порівняно зі шкірами першого варіанту.

Водночас ступінь відпрацювання сполук хрому також вищий на 8–10 %. Разом з тим підвищується вміст сполук хрому в шкірі. Це зумовлює підвищення T_{zc} шкіри. Слід зауважити, що з підвищенням вмісту сполук фосфонію спостерігається деяке зниження міцності шкіри. Цей ефект обумовлений підвищеним ступенем структурування колагену дерми, що знижує орієнтацію пучків волокон при деформуванні шкіри. Встановлено,

що витрата сполук хрому в кількості 1,0 % Cr_2O_3 забезпечує отримання шкіри з підвищеною гідротермічною стійкістю.

Таблиця 7. Фізико-хімічні властивості шкіри фосфоній-хромового дублення

Досліди	Витрати сполук Cr, % Cr_2O_3	T_{cc} , °C	Межа міцності, МПа	Розривне видовження, %	Вміст в дермі Cr_2O_3 , %	Ступінь відпрацювання сполук Cr, %
1	0,5	91,0	23,4	97,0	1,3	85,2
2	0,75	94,0	25,8	87,0	1,5	81,5
3	1,0	106,0	17,7	91,0	2,5	80,0
4	0,5	94,0	18,2	85,0	1,9	96,6
5	0,75	99,0	23,3	97,0	2,1	90,6
6	1,0	109,0	18,2	83,0	2,7	89,4

Отже, за розробленою технологією фосфоній-хромового дублення забезпечується менша витрата у 1,5–2,0 рази сполук хрому порівняно з традиційною технологією. При цьому отримується шкіра з необхідним комплексом пружно-пластичних властивостей і підвищеною гідротермічною стійкістю. Водночас досягається високий ступінь відпрацювання дубильного розчину, що досягає 96,6 % сполук хрому. Суттєве зниження витрат сполук хрому досягається при використанні монтморилоніту в процесі хромового дублення голини [23]. При цьому використовують голину з сировини ВРХ після знезолування, яку обробляли розчином хлориду натрію і мурашиної кислоти з витратами відповідно 6,0 та 0,2 % маси зеленої голини та 80 % води протягом 10 хв. Для дублення голини застосовано комплексний дубитель – ОСХ модифікований монтморилонітом з додаванням ОСХ (табл.8).

Таблиця 8. Умови хромморилонітного дублення голини

Варіант	Cr_2O_3 , % маси голини		ММ, % маси голини	рН через 12 год дублення
	в ММ	в ОСХ		
1	0,1	0,9	1,0	3,6
2	0,2	0,8	2,0	3,6
3	0,3	0,7	3,0	3,8
4	0	2,0	0	2,8

За контрольним варіантом дублення використано тільки ОСХ при витраті 2,0 % маси голини. Дублений напівфабрикат підлужували форміатом і бікарбонатом натрію з витратами 0,5 та 0,8 % відповідно. Для отримання зразків шкіри напівфабрикат обробляли жирною емульсією Provel ВА фірми Simmer & Schwarz (Німеччина) з витратою 6 % маси голини в розрахунок на технічний продукт. Процес жирування закінчували при рН 5,4.

Отримані результати впливу витрат сполук хрому на хімічний склад отриманої шкіри (табл. 9) свідчать про збільшення вмісту Cr_2O_3 в шкірі та відпрацьованому розчині при підвищенні вмісту сполук хрому в монтморилоніті. При цьому порівняно з контрольним варіантом технології

хромбентонітного дублення вміст Cr_2O_3 в зразках шкіри та відпрацьованих розчинах є меншим відповідно на 1,7–2,0 і 3,2–4,6 рази. Цей ефект свідчить про активну взаємодію хромомонтморилонітних комплексів з йонізованими карбоксильними групами макромолекул колагену. Водночас гідроксильні групи монтморилоніту, що розташовані у хромових комплексах, активніше витісняються йонізованими групами колагену.

Таблиця 9. Хімічний склад зразків шкіри хромбентонітного дублення

Показник	Варіант			
	1	2	3	4
Вміст в шкірі, мас. %, в розрахунку на безводний стан: Cr_2O_3	2,13	2,54	2,38	4,32
мінеральних речовин	5,57	6,77	7,88	5,72
РЕОР*	6,63	6,52	6,34	6,78
білкової речовини	85,9	84,9	83,7	86,3
Вміст Cr_2O_3 у відпрацьованому розчині, г/дм ³	2,04	1,42	1,53	6,52

Примітка. *Речовини екстраговані органічними розчинниками.

Застосування хромомонтморилонітного дублення дає можливість скоротити у двічі витрати сполук хрому і отримати шкіру з підвищеними фізико-механічними властивостями. Разом з тим отримується шкіра зі збільшеним виходом площі до 5,2 %. Отже, хромомонтморилонітне дублення голини зі шкур великої рогатої худоби можна вважати перспективним для отримання еластичних шкіряних матеріалів з підвищеними фізико-хімічними властивостями при суттєвому зменшенні витрат сполук хрому.

Мінімізація сполук хрому в процесах дублення недвоєної голини та наступного додублювання отриманого напівфабрикату з сировини ялівки важкої досягнута завдяки використанню алкілкарбоксиетаноламінів аліфатичних кислот (АКЕА АК) [24]. Всі технологічні процеси формування шкіри проводили в умовах кафедри біотехнології, шкіри та хутра Київського національного університету технологій та дизайну в барабані об'ємом 18 дм³ при обертанні зі швидкістю 11 ± 1 хв⁻¹. Недвоєну голину після знезолування і м'якшення обробляли кислотнo-сольовою сумішшю з витратами, мас. %: хлориду натрію – 4, мурашиної кислоти 85 % – 0,25, сірчаної кислоти 100 % – 0,5, води – 40 маси голини. При чому мурашину кислоту в технологічний розчин додавали через 10 хв після хлориду натрію, а сірчану кислоту – через 10–15 хв після нього. Процес тривав 3,5 год і завершувався при рН розчину 2,6–2,8. Водночас витрати води і хлориду натрію були зменшені у 1,5 рази, а тривалість процесу пікелювання в 1,8 рази порівняно з контрольною технологією [25]. У відпрацьований розчин вводили 0,8 % АКЕА АК, а через 10 хв у реакційну систему додавали ОСХ основністю 35 % в розрахунку на Cr_2O_3 – 1,2 %. Ця витрата є меншою в 1,7 рази порівняно з контрольною технологією, в якій основність ОСХ передбачена дещо вищою. Через одну год дублення розчин підлужували оксидом магнію до рН 4,0–4,2. Дублення

напівфабрикату тривало 5 год, що в 2,0–2,4 рази було коротшим порівняно з контрольним варіантом технології.

Для ефективного використання площі шкіряного напівфабрикату проводили його двоїння на товщину 1,3–1,4 мм. Підвищення рівномірності розподілу сполук хрому в об'ємі напівфабрикату і гідротермічної стійкості виконували шляхом його додублювання ОСХ з витратами 1,2 % Cr_2O_3 . Для цього напівфабрикат промивали при 50 % витраті води з додаванням 0,2 % мурашиної кислоти і стільки ж АКЕА АК за температури 30 °С протягом 40 хв. Після зливання відпрацьованого розчину в барабан заливали 100 % води і додавали 0,25 % мурашиної кислоти. Через 10 хв перемішування вмісту барабана, в систему вводили 1,0 % синтану SMA-678, що забезпечує зміцнення лицьового шару, а через 20 хв – 0,8 % АКЕА АК. У подальшому для додублювання через 10 хв дозували ОСХ в кількості 1,2 % Cr_2O_3 основність якого підвищували форміатом натрію через одну годину і перемішування системи продовжували протягом 0,5 год. Додублювання напівфабрикату завершували за рН 4,8 при додаванні модифікованих форміатом натрію алюмокалієвих галунів. Додублювально-наповнювальні процеси закінчували за типовою технологією.

В процесах формування шкіряного матеріалу відбувається комплекс хімічних процесів взаємодії АКЕА АК як з колагеном дерми, так і з ОСХ. Використання АКЕА АК перед додаванням ОСХ забезпечує прискорену його дифузію у міжмікрофібрилярні проміжки структури колагену завдяки блокуванню його амінокислотних залишків гідрофільних ділянок. При цьому завдяки високій спорідненості атомів кисню молекул АКЕА АК до йонів хрому відбувається заміна адендів молекул води в структурі хромових комплексів. Отримана шкіра характеризується підвищеним вмістом сполук хрому при менших їх витратах за розробленою технологією порівняно з діючою завдяки більш рівномірного їх розподілу α і навіть меншому вмісті в напівфабрикаті (таблиця 10).

Таблиця 10. Фізико-хімічні властивості дубленого та додубленого напівфабрикату

Показник	Напівфабрикат			
	дублений за технологією		додублений за технологією	
	розробленою	діючою	розробленою	діючою
T_{2c} , °С	110 / 105	109 / 102	112,0	109,0
в шкірі: Cr_2O_3 , %	3,91 / 4,16	4,71 / 5,13	5,56	6,76
розподіл Cr_2O_3 , α^*	0,91	0,82	–	–
мінеральних речовин, %	7,23 / 8,17	8,24 / 9,38	8,32	9,68

Примітки. 1. $\alpha^* = a + v / 2b$, де a , v – вміст Cr_2O_3 у шарах шкіри: зовнішніх, b – середньому; 2. У чисельнику і знаменнику наведені результати дублення відповідно недвоєного і двоєного напівфабрикату.

Спостерігається підвищення гідротермічної стійкості готової шкіри при деякому зменшенні її пористості.

Отже, розроблена технологія дубильно-додублювальних процесів формування еластичної шкіри з напівфабрикату ялівки важкої при

використанні основного сульфату хрому та алкілкарбокситаноламінів алкілкарбонових кислот забезпечує скорочення витрат сполук хрому в 1,7 рази порівняно з традиційною технологією. Це дає підстави віднести розроблену технологію до хромошадних і перспективних для впровадження у виробництво шкіряних матеріалів широкого асортименту.

Висновки. Розглянуто колоїдно-хімічні особливості взаємодії комплексів сполук хрому з активними групами макромолекул мікрофібрил колагену. Встановлено, що для проведення процесу хромового дублення необхідно реалізувати оптимальну активність карбоксильних груп колагену після забезпечення дифузії сполук хрому для досягнення максимального ступеня його зв'язування з колагеном дерми. При цьому для хромового дублення дерми шкур тварин рекомендують використовувати допоміжні речовини різного функціонального призначення. Так, сульфоароматична кислота марки С рекомендується використовувати при хромовому дубленні недвоєного напівфабрикату ВРХ. Глутаровий альдегід і сполуки алюмінію можуть бути використаними при отриманні протезної шкіри хромового дублення. Сполуки фосфонію можна використовувати при отриманні шкіри з бактерицидними властивостями, стійкої до дії поту і мікроорганізмів. Природний полісахарид хітозан ефективно може використовуватись при виготовленні еластичної шкіри, зокрема підкладкової.

Використання природного алюмосилікату монтморилоніту може бути перспективним при отриманні еластичних шкір. Алкілкарбокситаноламіни синтетичних жирних кислот C_{7-9} забезпечують ефективне проведення дубильно-додублювальних процесів сполуками хрому. При розробленні дубильно-додублювальних технологій, що забезпечують мінімізацію витрат сполук хрому, необхідно враховувати властивості готового шкіряного матеріалу та умови експлуатації виробів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Sundar V. J., Raghava Rao J., Muralidharan C. Cleaner chrome tanning – emerging options. *Journal of Cleaner Production*. 2002. Vol. 10, № 1. P. 69–74. [https://doi.org/10.1016/S0959-6526\(01\)00015-4](https://doi.org/10.1016/S0959-6526(01)00015-4).
2. Ramasami T. Pollution control in leather industry – emerging technological options. Paper presented at IUPAC, 1998.
3. Андрєєва О.А. Фізика та хімія протеїнів : навч. посіб. Київ : КНУТД, 2003. 224 с.
4. Gryshenco I. M., Danylcovych A. G., Zvarych I. T. New effective ecology-oriented technologies of leather and fur materials production ; under general editorship I. M. Gryshenco, I. T. Zvarych. Kyiv : Svit Uspichu, 2019. 304 p.
5. Reich, G. Collagen report : A Review about the present State. *Das Leder* 1995. № 8. P. 192–199.
6. Heidemann, E. Eine erweiterte Theorie der Kochfesten Gerbung, Lokalisation im Kollagen. *Das Leder*. 1994. № 1. P. 2–12.
7. Heidemann, E. Überlegungen, wie die Massen von Gerbstoffen und Fetten in der Kollagenstruktur eingelagert werden. *Das Leder*. 1995. № 6. P. 149–154.
8. Коновал В. П., Гаркавенко С. С. Ресурсозбережні технології виробництва взуттєвих шкір : Інноваційні технології виробництва шкіряних і хутрових матеріалів та виробів ; За ред. А. Г. Данилковича. Київ : Фенікс, 2012. С. 176–230.

9. Плаван В. П. Новітні технології органічно-мінерального дублення шкір тварин : Екологічно орієнтовані технології виробництва шкіряних та хутрових матеріалів для створення конкурентоспроможних товарів ; За ред. А. Г. Данилковича. Київ : Фенікс, 2011. С. 266–328 с.
10. Плаван В. П., Цимбаленко О. П., Журавський В. А. Сучасний стан та перспективи розвитку виробництва хромових дубителів. *Вісник ДАЛПТУ*. 2000. № 3. С. 69–72.
11. Бондаренко С. Г., Сангінова О. В., Шахновський А. М. Чисельні методи в хімії та хімічній технології [Електронний ресурс]. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024. 564 с.
12. Ліщук В., Данилкович А., Жигоцький О. Структура і хімічна активність колагену і кератину в технологічних процесах. *Легка промисловість*. 2011, № 2. С. 27–30.
13. Danylkovych A., Lishchuk V., Zhygotsky A. Structuring of Collagen of the Dermis During Rawhide Formation. *Ch&ChT*. 2017. Vol. 11, № 1. P. 81–91. <http://science2016.lp.edu.ua/chcht/structuring-collagen-dermis-during-rawhide-formation>.
14. Sundar V. J., Raghava Rao J., Muralidharan C. Cleaner chrome tanning – emerging options. *Journal of Cleaner Production*. 2002. Vol. 10, № 1. P. 69–74. [https://doi.org/10.1016/S0959-6526\(01\)00015-4](https://doi.org/10.1016/S0959-6526(01)00015-4).
15. Zhang H., Chen X., Wang X., Qiang X., Li X, Li M. A salt-free pickling chrome tanning approach using a novel sulphonic aromatic acid structure. *Journal of Cleaner Production*. 2016. doi: 10.1016/j.jclepro.2016.11.113.
16. CLRI–LTM report on chrome management, 1996.
17. Muralidharan C. Ph. D. thesis, Anna University, Chennai, India, 1997.
18. Пат. № 44044 Україна. МПК⁷ С 14 С 3/00, 3/04, 3/10. Спосіб обробки шкіри. Плаван В. П. ; Заявник і патентовласник Київський національний університет технологій і дизайну. № u200905148 ; заявл. 25.05.2009 ; опубл. 10.09.2009, Бюл. № 17.
19. Плаван В. П., Данилкович А. Г. Застосування методів математичного моделювання та оптимізації для дослідження процесу дублення шкір. *Вісник ХНУ*. 2005. № 6. С. 134–139.
20. Плаван В. П., Данилкович А. Г., Цимбаленко О. П. Дослідження потостійкості шкір різних методів дублення. *Вісник ХНУ*. 2006. № 5. С. 82–87.
21. Плаван В. П., Ковтуненко О. В., Каташинський А. С. Застосування сполук фосфонію для комбінованого дублення шкір. *Вісник КНУТД*. 2008. № 6. С. 41–47.
22. Plavan V., Valeika V., Kovtunenکو O. Shirvaityte J. THPS Pretreatment before tanning (Chrome or Non-Chrome). *Journal of the Society of Leather Technologists and Chemists*. 2009. Vol. 93. № 5. P. 186–192.
23. Mokrousova O., Danylkovich A., Palamar V. Resources-saving Chromium Tanning of Leather with the Use of Modified Montmorillonite. *Revista de Chimie*. 2015. 66. N 3. P. 353–357.
24. Данилкович А. Г., Охмат О. А. Хромощадне дублення шкіряного напівфабрикату для виготовлення еластичної шкіри. *Вісник ХНТУ*. 2025. № 2(93). Ч. 1, С. 41–47. <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.2.1.5>.
25. Данилкович А. Г., Мокроусова О. Р., Охмат О. А. Технологія і матеріали виробництва шкіри ; Під ред. А. Г. Данилковича. Київ : Фенікс, 2009. 580 с.

2.18 ДОСЛІДЖЕННЯ МІЖМОЛЕКУЛЯРНОЇ ВЗАЄМОДІЇ У ВОДНИХ РОЗЧИНАХ ПОЛІМЕРІВ КОНДУКТОМЕТРИЧНИМ МЕТОДОМ

Гриценко Т. О.¹, Баран Н. М.¹, Собечко І. Б.¹, Дулебова Л.²

¹Національний університет «Львівська політехніка»

²Технічний університет Кошице

taras.o.hrytsenko@lpnu.ua

Досліджено електропровідність розчинів водорозчинних полімерів – полівінілпіролідону, полівінілового спирту, поліетиленгліколю, поліакрилової кислоти, їх бінарних сумішей та систем у присутності мономеру 2-гідроксіетилметакрилату. Встановлено вплив природи, концентрації та співвідношення компонентів на електропровідність розчинів. Результати пояснюють механізми комплексоутворення й можуть бути використані для оптимізації складу гідрогелів із прогнозованими властивостями.

Ключові слова: електропровідність, комплекси, полівінілпіролідон, полівініловий спирт, поліетиленгліколь, поліакрилова кислота, 2-гідроксіетилметакрилат.

Причиною широкого та різноманітного використання полімерних гідрогелів є їх унікальна пориста структура у поєднанні з присутністю гідрофільних функційних груп, які забезпечують набрякання полімерної матриці у воді і інших полярних розчинниках, що обумовлює високу проникність для розчинених низькомолекулярних речовин. Завдяки сорбційній здатності, еластичності та стабільності форми у водному середовищі, сумісності з різними біологічними системами полімерні гідрогелі використовуються у різних сферах науки та практики – в медицині, сільському господарстві, будівництві, нафтопереробній промисловості, для очищення води та повітря, як елементи каталізаторів у хімічній технології, різного роду сенсорах тощо [1-3].

Значна частина сучасних досліджень в галузі гідрогелів спрямована на розроблення та синтез матеріалів з покращеними властивостями з можливістю використання в медицині та біотехнології – тканинній інженерії, направленій доставці ліків, створення імплантів, захисних медичних пов'язок, лікарських засобів пролонгованої дії тощо [4-7].

У плані створення гідрогельних біомедичних матеріалів становлять інтерес прищеплені кополімери, які містять у вихідній композиції гомогенні полімерні матриці, що дозволяє значно підвищити проникність, а внаслідок цього і біосумісність їх похідних.

Серед широкого спектру гідрогелевих полімерних матеріалів, відомих на даний час, гідрогелі на основі прищеплених кополімерів 2-гідроксіетилметакрилату (ГЕМА) з полівінілпіролідонем (ПВП) володіють

рядом цінних експлуатаційних властивостей [8, 9]. Особливо цікавими є кополімери на основі ГЕМА та ПВП (пГЕМА-пр-ПВП), отримані в присутності солей металів змінного ступеня окиснення [9, 10]. Порівняно з традиційними методами термоініційованої, фото- та радіаційної полімеризації в блоці чи розчині, які характеризуються багатостадійністю та довготривалістю, ініціювання солями металів відзначається високою реакційною здатністю та малими енергетичними параметрами [11-13].

Однак, прищеплені полімери на основі ПВП мають не завжди достатню міцність, сорбційні та дифузійні характеристики. Проблема може бути вирішена або за допомогою синтезу нових матеріалів із заданим комплексом властивостей, або модифікацією вже існуючих. Одним із методів модифікування пГЕМА-пр-ПВП кополімерів є введення у їх структуру додаткових функціональноактивних водорозчинних полімерів (ФВП), тобто синтез гідрогелів в присутності комбінованих полімерних матриць. Підбором системи полімерів у кожному конкретному випадку можливо в широких межах регулювати характеристики гідрогелів та створювати матеріали з прогнозованими властивостями.

Важливим питанням модифікації гідрогелів в цьому напрямку є дослідження комплексоутворення між полімерами, які вводяться у вихідну композицію з ПВП та ГЕМА. Присутність таких комплексів безперечно буде впливати на ефективність змішування компонентів вихідної композиції, формування структури і, відповідно, на властивості одержаних кополімерів і гідрогелів на їх основі. У зв'язку з цим, здійснення досліджень в напрямку розроблення нових, спрощених у технологічному виконанні та високопродуктивних методів модифікації гідрогелевих матеріалів на їх основі є актуальним і представляє як теоретичний, так і практичний інтерес.

Мета цієї роботи – вивчення взаємодії між водорозчинними полімерами та водорозчинними полімерами з мономером ГЕМА за допомогою дослідження електропровідності їх водних розчинів.

Для досліджень використовували ГЕМА ($\rho_{20}=1079$ кг/м³, $n_D^{20}=1,4520$), який очищували перегонкою у вакуумі (залишковий тиск 130 Н/м², $T_{кип}=351$ К), водорозчинні полімери – полівініловий спирт (ПВС) марки Selvol 52 SM (ступінь гідролізу 87-89 %), поліетиленгліколь PEG 6000 (ПЕГ), ПВП високої очистки з ММ 12000 та поліакриловоу кислоту (ПАК) у вигляді 30%-го водного розчину. Водні розчини полімерів (крім ПВС) та полімерів з мономером готували за кімнатної температури протягом 5-20 хв. ПВС розчиняли за температури 85 - 90°C протягом 40-60 хв.

Електропровідність розчинів встановлювали на основі їх електричного опору методом компенсації, використовуючи кондуктометричну комірку, яка складається з скляної посудини з впаяними в неї платиновими пластинками, що виступають у ролі електродів.

В попередніх роботах було доведено утворення комплексу з перенесенням заряду між ПВП та (мет)акрилатами [8], зокрема і потрійних комплексів за участі йонів металів змінного ступеня окиснення [14-16]. Викликає практичну зацікавленість дослідження впливу на вихідну полімер-

мономерну композиції ГЕМА/ПВП присутність додаткових ФВП та взаємодія між ПВП та ФВП, а також ГЕМА з ФВП, оскільки така взаємодія безперечно буде впливати на формування структури та властивості полімерів з комбінованою матрицею та гідрогелів на їх основі.

Якісним доказом утворення комплексів в досліджуваних системах є поява забарвлення їх розчинів (зокрема ГЕМА з ФВП). Про можливу взаємодію між ПВП, ГЕМА та ФВП робили висновок на основі дослідження електропровідності водних розчинів їх сумішей. Відомо, що комплекси з перенесенням заряду та з водневими зв'язками мають більшу електропровідність, ніж їх ізольовані компоненти. Так, наприклад, чисті ГЕМА та ПВП є діелектриками, однак їх суміші, крім появи стійкого жовтого забарвлення, стають електропровідними (рис.1).

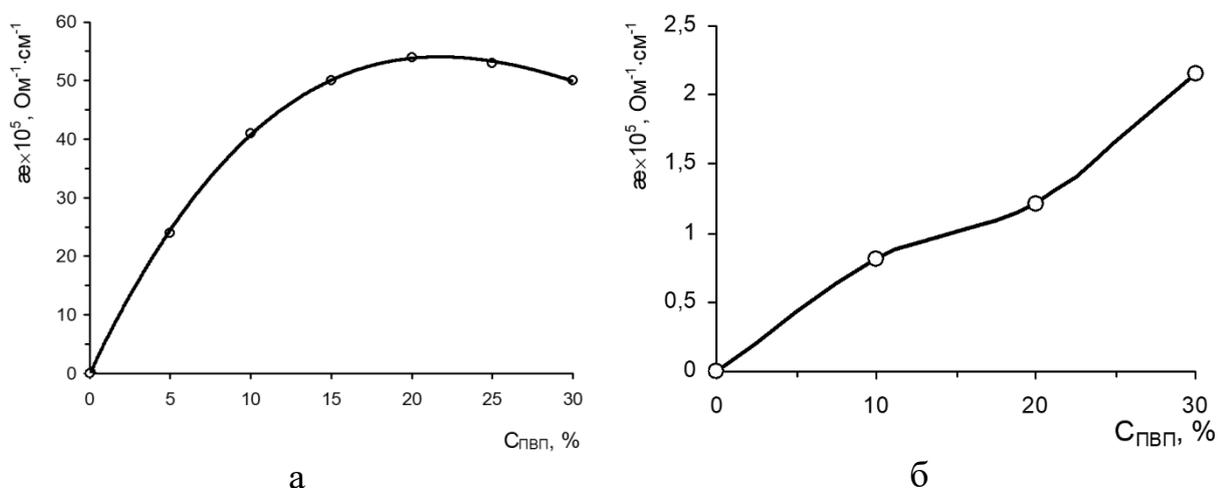


Рис. 1. Електропровідність розчинів ПВП у воді (а) та у ГЕМА (б)

Дослідження електропровідності водних розчинів використовуваних в роботі ФВП підтверджує природу полімерів – всі досліджувані полімери є поліелектролітами, причому електропровідність розчинів зростає із збільшенням їх концентрації (рис. 2.).

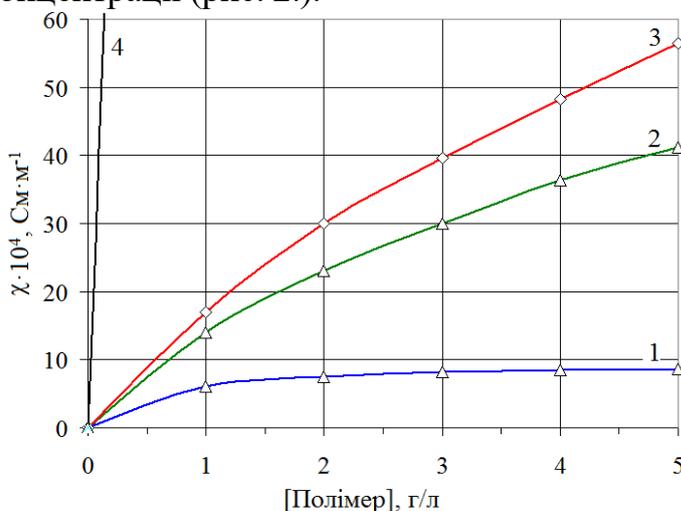


Рис. 2. Електропровідність водних розчинів полімерів: 1 – ПЕГ; 2 – ПВП; 3 – ПВС; 4 – ПАК

Встановлено, що електропровідність розчинів полімерів зростає в ряду: ПЕГ < ПВП < ПВС < ПАК. На таку залежність, закономірно, впливає природа функціональних груп, ступінь іонізації та кількість заряджених частинок, які полімер утворює у водному розчині. Електропровідність розчинів ПЕГ є найнижчою, оскільки ПЕГ майже не утворює іонів, практично не дисоціює у воді, електропровідність забезпечується лише домішками або дуже слабким іонним обміном з водою. Висока електропровідність водних розчинів ПВП, ПВС та ПАК пов'язана з утворенням їх іонної форми. В даному ряду зростає кількість полярних груп, покращується здатність до дисоціації, іони легше рухаються в розчині завдяки гідратації.

Оскільки об'єктом дослідження в роботі є комбіновані матриці на основі ПВП з ПЕГ, ПВС та ПАК, були проведені дослідження електропровідності розчинів ПВП/ПЕГ, ПВП/ПВС та ПВП/ПАК (рис. 3, а-в), а також впливу на провідність цих розчинів присутності мономеру – ГЕМА (рис. 3, г). Як свідчать одержані результати, додавання ПВП до розчинів ПВС та ПАК викликає зменшення їх електропровідності. Швидше за все, це відбувається через зменшення вмісту вільних іонів внаслідок утворення поліелектролітних комплексів. Зростання електропровідності розчину ПЕГ з додаванням ПВП також свідчить про можливе утворення міжполімерних комплексів завдяки водневим зв'язкам, які змінюють конфігурацію полімерних ланцюгів у розчині. Це може вплинути на структуру розчину – зменшується його в'язкість і, відповідно, покращується доступність вільних іонів та їх рух.

Різносторонній вплив на електропровідність розчинів сумішей полімерів чинить присутність мономеру (рис. 3, г) – у випадку розчину суміші полімерів ПВП/ПЕГ електропровідність зростає, для розчину ПВП/ПВС – зменшується, при введенні мономеру у розчин суміші ПВП/ПАК електропровідність розчину майже не змінюється.

Присутність у розчинах двох полімерів з різною активністю не дає можливості зробити висновок про взаємодію конкретного полімеру з мономером. Тому, було досліджено вплив присутності ГЕМА на електропровідність окремих розчинів ПВП, ПВС, ПЕГ та ПАК (рис. 4).

Як бачимо з приведених результатів, додавання мономеру до розчинів ПВП (рис. 4,а), ПВС (рис. 4,б) та ПАК (рис. 4,в) викликає зменшення їх електропровідності. Додавання ж ГЕМА до розчину ПЕГ призводить до підвищення його провідності. Встановлені зміни електропровідності систем полімер/мономер у кожному випадку характеризують присутність фізичної взаємодії між її компонентами.

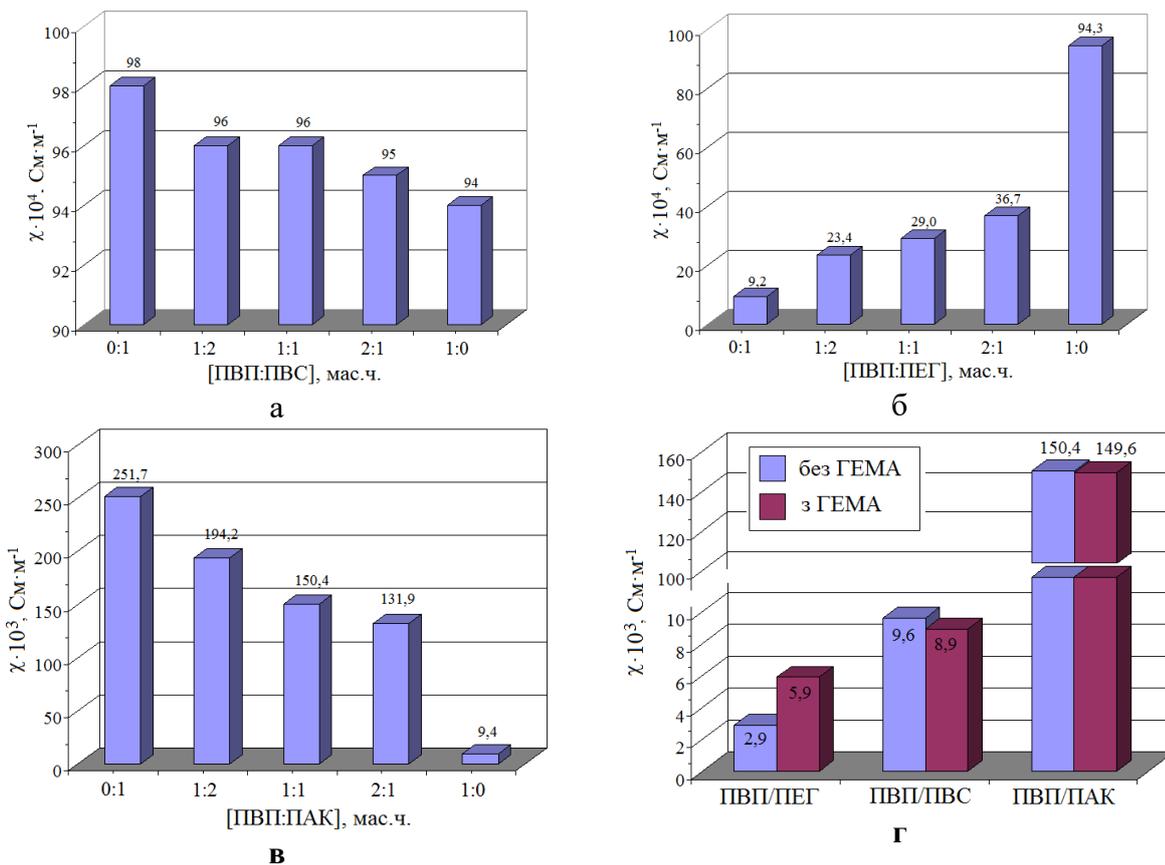


Рис. 3. Залежність питомої електропровідності (χ) водних розчинів ПВП/ПВС (а), ПВП/ПЕГ (б), ПВП/ПАК (в) від співвідношення ПВП/ФВП (СПВП/ВП=10 г/л) та присутності мономеру (г) (ПВП:ВП=1:1 мас.ч., ПВП:ГЕМА=1:1 мас.ч.)

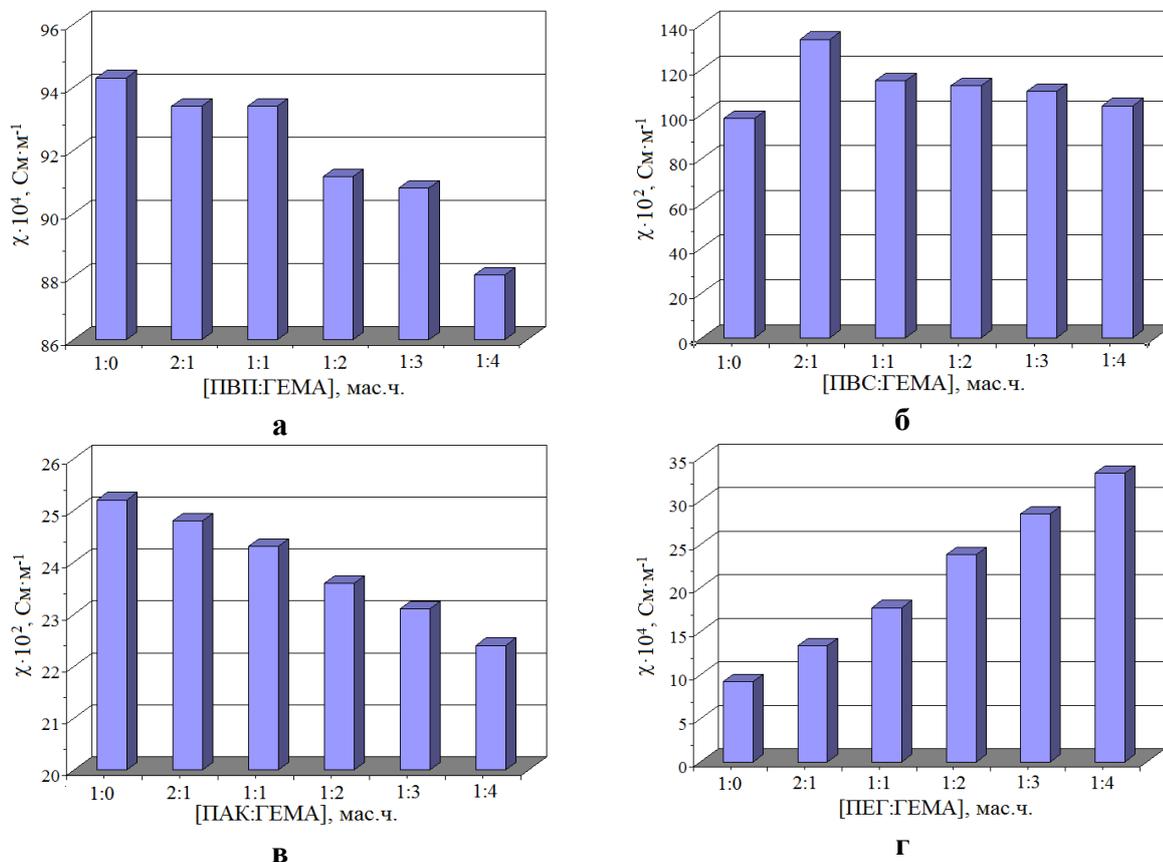


Рис. 4. Залежність питомої електропровідності (χ) розчинів ФВП від вмісту ГЕМА. ФВП: а – ПВП; б – ПВС; в – ПАК; г – ПЕГ

У випадку ПВП, ПВС та ПАК, в структурі яких присутні гідрофільні полярні групи з координованими молекулами води, мономер, імовірно, заміщає молекули H_2O та блокує активні центри макромолекул. Молекули ПЕГ і ГЕМА можуть взаємодіяти через водневі зв'язки (ГЕМА містить гідроксильну групу, яка може вступати у водневі зв'язки з ПЕГ). У водному середовищі гідроксильні групи можуть частково дисоціювати, що призводить до збільшення концентрації рухомих іонів (зокрема, іонів H^+ або OH^-), а отже – до підвищення електропровідності. Тобто, у кожному випадку відбувається зміна електропровідності під час змішування полімерів, а також полімерів і мономеру, що є підтвердженням взаємодії між інгредієнтами розчинів.

Висновки. У результаті проведеного дослідження встановлено, що електропровідність розчинів водорозчинних полімерів суттєво залежить від природи полімеру, його концентрації, а також наявності додаткових компонентів у системі, зокрема мономеру. Визначено, що для індивідуальних полімерів характерна специфічна залежність електропровідності від концентрації, що пов'язано зі ступенем іонізації функціональних груп та структурою макромолекул.

Дослідження електропровідності розчинів сумішей полімерів виявило різний ефект, який залежить від виду полімерів та складу системи, що свідчить про складні міжмолекулярні взаємодії між компонентами. Особливу увагу приділено вивченню розчинів полімерів у присутності мономеру та зафіксовано зміну електропровідності, зумовлену взаємодією мономеру з полімерними ланцюгами та можливим формуванням комплексів.

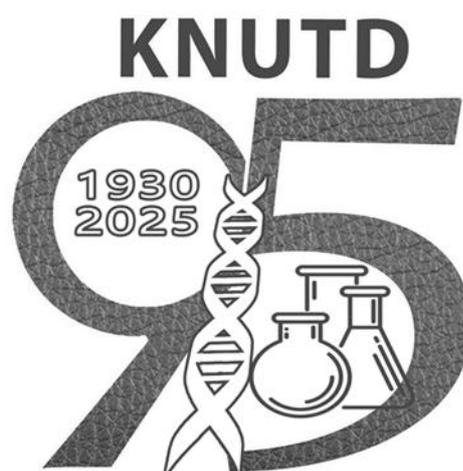
Отримані результати будуть використані для оптимізації складу полімерних систем у технологічних процесах, зокрема в синтезі гідрогелів на основі пГЕМА-пр-ПВП кополімерів з необхідними характеристиками.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Madduma Bandarage U.S.K., Madihally S.V. Synthetic hydrogels: Synthesis, novel trends, and applications. *J. Appl. Polym. Sci.* 2020. №138(19). P. E50376.
2. Popa L., Violeta Ghica M., Elena Dinu-Pîrvu C., Tudoroiu E.-E. Introductory chapter: Hydrogels in comprehensive overviews, recent trends on their broad applications. In *Hydrogels – From tradition to innovative platforms with multiple applications*; Popa, L., Violeta Ghica M., and Dinu-Pîrvu C.E. Eds.; IntechOpen: London, UK. 2023.
3. Kaith B.S., Singh A., Sharma A.K., Sud D. Hydrogels: Synthesis, classification, properties and potential applications – A brief review. *J. Polym. Environ.* 2021. №29, P. 3827–3841.
4. Vigata M., Meinert C., Huttmacher D.W., Bock N. Hydrogels as drug delivery systems: A review of current characterization and evaluation techniques. *Pharmaceutics.* 2020. №12. P. 1188.
5. Chen Q., He Y., Li Q., Yang K., Sun L., Xu H., Wang R. Intelligent design and medical applications of antimicrobial hydrogels. *Colloid Interface Sci. Commun.* 2023. №53. P. 100696
6. Li X., Xu M., Geng Z., Liu Y. Functional hydrogels for the repair and regeneration of tissue defects. *Front. Bioeng. Biotechnol.* 2023. №11, P. 1190171.
7. Sobczak-Kupiec A., Kudłacik-Kramarczyk S., Drabczyk A., Cylka K., Tyliczszak B. Studies on PVP-based hydrogel polymers as dressing materials with prolonged anticancer drug delivery function. *Materials.* 2023. №16. P. 2468.

8. Suberlyak O., & Skorokhoda V. Hydrogels based on polyvinylpyrrolidone copolymers. Haider & A. Haider (Eds.), *Hydrogels* (pp. 136-214). London, UK: IntechOpen. 2018.
9. Grytsenko O., Dulebova L., Suberlyak O., Skorokhoda V., Spišák E., Gajdos I. Features of structure and properties of pHEMA-gr-PVP block copolymers, obtained in the presence of Fe^{2+} . *Materials*. 2020. №13. P. 4580-4594.
10. Suberlyak O., Grytsenko O., Kochubei V. The role of $FeSO_4$ in the obtaining of polyvinylpyrrolidone copolymers. *Chem. Chem. Technol.* 2015. №9. P. 429-434.
11. Суберляк О. В., Скорохода В. Й., Гриценко О. М. Наукові аспекти розроблення технології синтезу гідрофільних кополімерів полівінілпіролідону. *Питання хімії та хімічної технології*. 2000. №1. С.236–238.
12. Гриценко О. М., Скорохода В. Й., Шаповал П. Й., Бухвак І. В. Дослідження прищепленої полімеризації на ПВП, ініційованої солями металів змінної валентності. *Вісник ДУ «ЛП»*. 2000. №414. С.82-85.
13. Гриценко О. М., Скорохода В. Й., Ядушинський Р. Я. Структурні параметри та властивості кополімерів 2-ОЕМА-ПВП, одержаних в присутності Fe^{2+} . *Вісник НУ «ЛП»*. 2004. №488. С.300-303.
14. Suberlyak O., Skorokhoda V., Grytsenko O. Complex PVP- Me^{n+} – active catalyst of vinyl monomers polymerization. In: *Materiały Polimerowe i ich Przetwórstwo*. Częstohowa: Wydawnictwo Politechniki Częstohowskiej. 2004. P. 140-145.
15. Гриценко О. М., Гавло І. І., Скорохода В. Й., Суберляк О. В. Дослідження полімеризації ПВП-(мет)акрилатних композицій, ініційованої Fe^{n+} . *Вісник НУ «ЛП»*. 2001. №426. С.68-70.
16. Гриценко О. М. Дослідження комплексоутворення в системі полівінілпіролідон–метакрилат–йон металу. *Вісник Вісник НУ «ЛП»*. 2006. №553. С. 295-298.

РОЗДІЛ 3
ЕКОЛОГІЯ



3.1 TOWARD SUSTAINABLE ECOLOGICAL SYSTEMS: LESSONS FROM CANADA AND UKRAINE

Svitlana Abu Deeb

Ept, Canada
lanaabudeeb@gmail.com

Canada and Ukraine share large agricultural landscapes, globally significant wetlands, forest biomes, and river basins where competing demands for food, energy, biodiversity, and climate goals collide. Yet their ecological governance, economic structures, and historical trajectories differ markedly. This paper develops a comparative framework to examine how institutions, policies, and practices shape ecological outcomes in both countries and distills practical lessons that can travel in either direction. We analyze governance arrangements; protected and conserved areas; biodiversity and species at risk; water quality and nutrient management; peatland and forest restoration; Indigenous and community stewardship; and nature-positive post-conflict reconstruction. We complement the framework with brief case studies (Lake Winnipeg vs. Dnipro Basin nutrients; prairie pothole wetlands vs. Polissya peatlands; boreal caribou range planning vs. community forestry; and green reconstruction pilots). We conclude with ten cross-cutting recommendations emphasizing watershed-scale planning, payment for ecosystem services, high-integrity restoration, data interoperability, and equitable participation. The article is intended to guide policy dialogue and program design for governments, practitioners, and donors supporting ecological transitions in temperate agro-forest landscapes.

Keywords: *ecological governance; restoration; wetlands; forests; biodiversity; Indigenous stewardship; Ukraine; Canada; nutrient management; green reconstruction*

Both Canada and Ukraine are custodians of biodiversity-rich temperate and boreal systems. Canada's ecological policy is anchored in a federal system with substantial provincial, territorial, and Indigenous jurisdictional roles. Ukraine, a unitary state integrating EU-aligned environmental acquis, is simultaneously undergoing decentralization reforms and, since 2022, managing wartime ecological damage and planning for nature-positive recovery. Despite different contexts, both countries face convergent challenges: climate change, agricultural intensification, nutrient loading in large watersheds, peatland drainage, forest health risks, and the need to align economic development with biodiversity and climate targets.

This paper asks: (i) Which governance and policy instruments have delivered measurable ecological gains in each country? (ii) What institutional and programmatic lessons are transferable across contexts? (iii) How can bilateral and multilateral cooperation accelerate ecological systems transitions

and resilient reconstruction? We use a structured comparative approach, drawing on public policy analyses, program evaluations, and practitioner experience. While quantitative indicators are referenced, the primary contribution is a synthesis of institutional mechanisms and implementation lessons.

Methods and Comparative Framework

We apply a seven-pillar framework: 1) *Institutions & Law* (constitutional arrangements; EU alignment; treaty implementation). 2) *Planning Instruments* (species at risk recovery plans; basin management plans; land-use zoning; strategic environmental assessment). 3) *Economic Instruments* (agri-environment schemes; carbon pricing/offsets; payments for ecosystem services; producer responsibility). 4) *Conservation Estates* (protected and conserved areas, OECMs; community/Indigenous-managed areas; ecological connectivity). 5) *Restoration & Nature-based Solutions* (wetland/peatland rewetting; forest regeneration; grassland restoration; shoreline buffers). 6) *Knowledge & Data Systems* (monitoring, Earth observation, open data, citizen science). 7) *Equity & Participation* (Indigenous rights and knowledge; community forestry; stakeholder engagement; environmental justice).

Evidence was organized into comparable indicators rated qualitatively (*Strong / Moderate / Emerging / Gap*). Case studies exemplify instrument design and on-the-ground delivery. The approach privileges replicable mechanisms over one-off pilot successes.

Biophysical and Socio-economic Context

- **Canada:** Boreal forest dominates; significant prairie grasslands and prairie pothole wetlands; Arctic and sub-Arctic ecosystems; extensive hydropower and mining; export-oriented agriculture (canola, wheat, pulses). Climate policy uses carbon pricing (federal backstop in some provinces) with provincial variation. Indigenous Peoples—First Nations, Inuit, and Métis—hold constitutionally protected rights; Indigenous Protected and Conserved Areas (IPCAs) are rising as a governance pathway.

- **Ukraine:** Forest-steppe, steppe, and Polissya (mixed forest) regions; globally important black soils (Chernozem); large river basins (Dniro, Dniester, Southern Bug) and coastal ecosystems (Black Sea, Azov). EU Association Agreement drives acquis alignment (e.g., Habitats and Birds Directives analogues via Emerald Network). Ongoing war imposes ecological damage and disrupts governance and monitoring, while accelerating plans for green reconstruction aligned with EU accession.

Governance & Institutions

Canada: Multi-level governance engages federal (e.g., species at risk, fisheries, migratory birds), provincial/territorial (land, natural resources), municipal planning, and Indigenous authorities. Co-management boards and modern treaties enable shared stewardship. Strengths include stable financing mechanisms for protected areas and conservation NGOs, and robust environmental assessment processes (though contested and evolving).

Ukraine: Central ministries set policy and oversight; oblasts and hromadas implement land-use and community-level decisions. EU-driven reforms strengthen environmental impact assessment (EIA), strategic environmental assessment (SEA), waste frameworks, and air/water standards. Challenges include enforcement capacity, legacy pollution sites, and integrating war-time damage assessment with long-term planning.

Lesson 1: Durable ecological outcomes require legal clarity on roles, long-term financing, and accountability for implementation—not just law on the books.

Conservation Estates, Connectivity, and Species at Risk

- **Canada:** Accelerating 30x30 targets via protected areas and OECMs; IPCAs expand rights-based conservation. Landscape-scale connectivity (e.g., boreal caribou range planning) remains uneven but maturing. Private land conservation and easements are important in agricultural regions [1].

- **Ukraine:** Emerald Network expansion and Natura-consistent site designation are progressing. Strengthening management plans, connectivity corridors, and buffer zones is a near-term priority. War has created both acute risks (fires, contamination) and opportunities (temporary reduction of human pressure in some areas), requiring careful management.

Lesson 2: Recognize and resource community-based conservation (including IPCAs and community forests) as scalable governance, not side projects.

Water Quality and Nutrient Management

Canada (Lake Winnipeg Basin): Nutrient inputs from agriculture and wastewater drive eutrophication; responses include phosphorus reduction targets, wetland retention, riparian buffers, manure management, and municipal upgrades. Cross-jurisdictional coordination is essential given prairie hydrology and interprovincial waters[2].

Ukraine (Dnipro Basin): Similar nutrient pressures from intensive agriculture and legacy industry; EU Water Framework-style basin plans guide measures. Upgrading municipal wastewater treatment, restoring floodplains/oxbows, and agricultural best management practices (BMPs) are central.

Lesson 3: Basin-scale nutrient budgets linked to performance-based agri-environment payments outperform piecemeal project grants.

Wetlands and Peatlands

Prairie Pothole Region (Canada): Small wetlands provide disproportionate water storage, biodiversity, and carbon benefits; drainage and consolidation persist. Policy tools include “no net loss,” conservation easements, and incentive programs.

Polissya Peatlands (Ukraine): Historical drainage for forestry/agriculture degraded carbon and habitat values; rewetting and paludiculture are rising priorities. Post-fire restoration and contamination risk management intersect with rewetting strategies.

Lesson 4: High-integrity wetland/peatland restoration requires hydrological reconnection, long-term monitoring, and funding models that reward verified outcomes (e.g., results-based contracts, carbon/biocarbon markets with strong safeguards).

Forests and Community Stewardship

Canada: Sustainable forest management frameworks with certification uptake; wildfire risk and insect outbreaks intensifying under climate change. Indigenous stewardship, cultural burning, and caribou habitat management are central.

Ukraine: Mixed ownership/management with state enterprises; increasing certification; opportunities for community forestry in decentralized hromadas. Post-war timber salvage requires strict ecological safeguards to avoid lock-in of degraded states[3].

Lesson 5: Integrate climate-smart silviculture with Indigenous/local knowledge and landscape-level habitat objectives; avoid “rebuild fast” pressures that sacrifice ecological integrity.

Economic Instruments and Financing

- **Agri-environment schemes:** Move from practice-based payments to outcome-based (nutrient load reductions, wetland retention indices).

- **Carbon & biodiversity credits:** Use only high-integrity methodologies; prioritize jurisdictional/landscape approaches over small offset projects to minimize leakage and ensure additionality.

- **Extended Producer Responsibility (EPR):** Scale EPR for packaging, tires, electronics to reduce waste and microplastics.

- **Green reconstruction (Ukraine):** Blend grants, concessional loans, and guarantees with nature-based solutions embedded in infrastructure (e.g., green flood defences, urban green-blue networks).

Lesson 6: Tie financing to verified ecological performance with transparent MRV (measurement, reporting, verification) and public dashboards

Knowledge & Data Systems

Open, interoperable environmental data accelerates accountability and innovation. Priorities include: harmonized basin models (nutrient, sediment), Earth observation for peatland water tables and wildfire risk, biodiversity occurrence databases, and participatory monitoring. Cross-country twinning of observatories (e.g., Lake Winnipeg ↔ Dnipro; Polissya ↔ Prairie Pothole) can standardize indicators and methods[4].

Lesson 7: Invest early in data standards and community-owned platforms; retrofits are costlier and politically harder.

Equity, Rights, and Participation

Canada: Indigenous rights and knowledge are integral to conservation and resource decisions; IPCAs and co-governance are expanding. Equitable participation also includes rural municipalities and farmers who steward most remaining prairie habitats.

Ukraine: Public participation provisions in EIA/SEA are improving; decentralization empowers hromadas. Ensure meaningful inclusion of local communities, smallholders, and displaced people in restoration and reconstruction decisions.

Lesson 8: Ecological transitions stagnate without procedural justice and equitable benefit-sharing (e.g., stewardship payments, local jobs, accessible grievance mechanisms).

Case Studies (Comparative Briefs)

Lake Winnipeg vs. Dnipro Basin Nutrients – Instruments: phosphorus caps, municipal upgrades, agro-BMPs, wetland retention; river basin management plans; performance-based payments. – Transferable element: nested targets (sub-basins → basin), with transparent load apportionment and flexible compliance pathways[5].

Prairie Pothole Wetlands vs. Polissya Peatlands – Instruments: conservation easements, rewetting with water-level controls, paludiculture pilots, fire risk management. – Transferable element: hydrologic reconnection plus long-term O&M funding; remote sensing for water level verification.

Boreal Caribou Range Planning vs. Community Forestry – Instruments: range plans, habitat disturbance thresholds, stewardship agreements. Transferable element: landscape-scale planning with rights-based stewardship; avoid fragmenting permits that undercut range-level objectives[6].

Nature-Positive Reconstruction Pilots – Examples: green urban reconstruction (rain gardens, permeable pavements, urban forests), floodplain reconnection as natural infrastructure, contamination risk mapping with nature-based remediation. – Transferable element: mainstream nature-based solutions in all reconstruction finance with no-regret designs [7] [Tab.1].

Ten Cross-cutting Recommendations

1. **Adopt nested, basin-scale nutrient targets** with transparent load apportionment and flexible compliance.

2. **Fund wetland and peatland restoration as critical infrastructure** with long-term O&M and results-based contracts.

3. **Expand rights-based conservation** (IPCAs, community forests) and legally recognize stewardship agreements.

4. **Shift agri-environment support to outcomes** measured by verified nutrient and habitat indicators.

5. **Create binational (Canada–Ukraine) observatories** to harmonize indicators, models, and open data.

6. **Mainstream nature-based solutions in reconstruction finance** with safeguards and public MRV.

7. **Institutionalize co-governance and procedural justice**, including Indigenous/local knowledge in planning and monitoring.

8. **Develop high-integrity carbon/biodiversity crediting frameworks** at jurisdictional/landscape scales.

9. *Use EPR and circular economy policies* to reduce waste, microplastics, and lifecycle impacts.

10. *Invest in capacity building* (municipalities, hromadas, Indigenous governments, farmer networks) and technical assistance for implementation.

Table 1. Comparative Indicator Matrix

Pillar / Indicator	Canada (current state)	Ukraine (current state)	Notes
Legal clarity of ecological mandates	Strong	Moderate	Ukraine mid-stream EU acquis alignment; enforcement capacity building continues.
Basin-scale nutrient planning & MRV	Moderate	Emerging–Moderate	Data gaps in agricultural diffuse pollution; both countries improving modeling and open data.
Protected areas & OECMs coverage	Moderate–Strong	Emerging–Moderate	IPCAs growing; Ukraine expanding Emerald sites and management plans.
Wetland/peatland restoration scale	Emerging–Moderate	Emerging–Moderate	Both scaling pilots; funding and O&M continuity are constraints.
Indigenous/community governance	Strong	Emerging–Moderate	Community forestry/hromada stewardship presents opportunity in Ukraine.
High-integrity carbon/biodiversity finance	Emerging	Emerging	Integrity and safeguards are key in both contexts.
Open data & participatory monitoring	Moderate–Strong	Emerging–Moderate	Interoperability and long-term funding remain challenges.

Policy and Practice Implications

For Canada, the Ukraine experience with rapid acquis alignment underscores the value of codifying EU-style basin planning, which can sharpen Canada’s diffuse, multi-jurisdiction nutrient governance. For Ukraine, Canada’s IPCAs and co-management offer models for rights-based conservation and reconciliation with local communities, adaptable to hromada contexts. Both contexts benefit from performance-based financing and open data ecosystems that enable accountability and innovation [8-11].

Limitations

The comparative ratings are qualitative and should be validated with updated datasets (e.g., protected area coverage, nutrient loads, restoration hectares) and peer-reviewed evaluations. Wartime conditions in Ukraine create

rapidly changing baselines; some pathways may be constrained by security and funding realities [12].

Conclusion. Pursuing sustainable ecological systems in Canada and Ukraine hinges on aligning institutions, economic incentives, and community-led stewardship with credible monitoring and finance. The lessons distilled here point to scalable actions: basin-level nutrient governance, high-integrity restoration of wetlands and peatlands, rights-based conservation, and transparent data ecosystems. Bilateral cooperation—through twinned watersheds, shared observatories, and professional exchanges—can accelerate both countries’ progress toward biodiversity and climate goals while supporting nature-positive reconstruction.

REFERENCES

1. Environment and Climate Change Canada. (2023). Reports on Lake Winnipeg nutrient reductions; Canadian Protected and Conserved Areas Database; Species at Risk Program. Government of Canada. <https://www.canada.ca/en/environment-climate-change.html>
2. Fisheries and Oceans Canada. (2023). Migratory fish and habitat protection resources. Government of Canada. <https://www.dfo-mpo.gc.ca>
3. Indigenous Circle of Experts. (2018). We rise together: Achieving the pathway to Canada target 1 through the creation of Indigenous Protected and Conserved Areas in the spirit and practice of reconciliation. Environment and Climate Change Canada. https://publications.gc.ca/collections/collection_2018/eccc/En4-294-2018-eng.pdf
4. Government of Manitoba. (2023). Lake Winnipeg Basin initiatives; agricultural BMP guides; wetland policy resources. Manitoba Environment and Climate Change. https://www.gov.mb.ca/sd/pubs/water/lake_winnipeg
5. Ramsar Convention Secretariat. (2016). An introduction to the Ramsar Convention on wetlands (7th ed.). Ramsar Convention Secretariat. <https://www.ramsar.org>
6. Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services (IPBES). (2019). Global assessment report on biodiversity and ecosystem services. IPBES Secretariat. <https://ipbes.net/global-assessment>
7. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2021). Climate Change 2021: Impacts, adaptation, and vulnerability. Cambridge University Press. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2>
8. European Commission. (2023). Environmental acquis summaries; Water Framework Directive implementation guidance. European Union. <https://environment.ec.europa.eu>
9. Council of Europe. (2022). Emerald Network technical documentation for Ukraine. Bern Convention Bureau. <https://rm.coe.int/emerald-network>
10. Ministry of Environmental Protection and Natural Resources of Ukraine. (2023). National reports; Dnipro Basin management plans; SEA/EIA guidelines. Government of Ukraine. <https://mepr.gov.ua>
11. World Bank, Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD), & United Nations Environment Programme (UNEP). (2022). Environmental performance reviews and reconstruction frameworks focused on Ukraine. World Bank Group. <https://www.worldbank.org>
12. Various authors. (2022). Articles in peer-reviewed journals: Conservation Letters, Restoration Ecology, Ecological Economics, Ambio, Environmental Science & Policy, Journal of Environmental Management.

3.2 IMPACT OF CLIMATE CHANGES ON THE FUNCTIONING OF AQUATIC ECOSYSTEMS USING THE EXAMPLE OF SMALL RESERVOIRS IN SOUTHERN UKRAINE: A REVIEW

Sofia Melnychenko

Kherson State Agrarian and Economic University, Ukraine
melnychenko_s@ksaeu.kherson.ua

The paper examines the impact of climate transformations on the functioning of aquatic ecosystems of small reservoirs in southern Ukraine. The relevance of the study is due to the increase in temperature, decrease in precipitation and increase in evaporation, which leads to a disruption of the ecological balance of reservoirs. The aim is to determine the patterns of the impact of climate change on abiotic and biotic factors. The results showed the interdependence of temperature regime, transparency, oxygen balance and bioproductivity. The conclusions indicate that it is necessary to develop adaptation mechanisms to preserve the fishery potential of small reservoirs

Keywords: *ecosystem stability, ecological component, adaptation mechanisms, hydrobiological processes, eutrophication, water bodies.*

The problem of small reservoirs in southern Ukraine in the context of modern climate transformations is becoming particularly relevant in the context of rising average annual temperatures, decreasing precipitation, and increasing evaporation. These processes directly affect the hydrological regime of reservoirs, the structure of trophic chains and bioproductivity, causing eutrophication, a decrease in dissolved oxygen levels and a violation of the ecological balance. Small reservoirs have a limited ability to self-regulate, so even minor fluctuations in abiotic parameters can cause large-scale changes in the species composition of aquatic organisms, primary production processes, and biocenosis stability. Taken together, these factors determine the high level of vulnerability of small water bodies to climate fluctuations, making their scientific study extremely important for predicting the state of aquatic ecosystems and developing adaptation strategies.

The relevance of the study is stipulated by the need to preserve the fishery potential of small reservoirs, which play an important role in the country's food security, in particular in providing the population with high-quality fish products. Given that the existing hydrobiological processes in small reservoirs are increasingly affected by changes in temperature, water clarity, and nutrient levels, it is important to comprehensively study the interaction of biotic and abiotic factors that determine their ecological state. Solving these problems will not only help assess the extent of climate change impact on aquatic ecosystems, but also develop effective mechanisms for the rational use of water resources and sustainable development of fisheries in southern Ukraine.

The purpose of the study is to establish the patterns of influence of climate transformations on the abiotic and biotic factors of small reservoirs in southern Ukraine to optimize their ecological and fishery potential.

Object of research – aquatic ecosystems of small reservoirs in the southern region of Ukraine.

The research subject is the interrelation of abiotic and biotic factors in small reservoirs of southern Ukraine under the influence of modern climate change.

Materials and Methods

The study was informed by the scientific works of domestic and foreign scientists covering the impact of climate change on aquatic ecosystems, the peculiarities of small reservoirs and their bioproductive potential. To summarize the current scientific experience, the results of monitoring observations, climate models, hydroecological and hydrobiological studies were analyzed, which allowed us to identify the main trends in the transformation of abiotic and biotic parameters of aquatic ecosystems in the context of increasing temperature, changes in precipitation and nutrient dynamics.

In the course of the work, a set of research methods was applied: analytical, comparative, statistical, system-structural and graphical. The analytical method was used to study the theoretical positions and results of previous scientific works, the comparative method was used to identify the impact of climatic factors on small reservoirs, and the statistical method was used to summarize the numerical indicators of temperature, precipitation, and bioproductivity of water bodies. The system-structural approach made it possible to consider aquatic ecosystems as an integral system of interaction between biotic and abiotic elements, and the graphical method was used to visualize changes in climatic and hydroecological parameters in dynamics.

Results and Discussion

Having carried out a comprehensive analysis of the available numerous studies, we note that dynamic changes in air temperature affect the functioning of aquatic ecosystems. In particular, the level of light penetration; temperature and chemical composition of water; its transparency and salinity [6, 14, 40].

The current and projected increase in temperature in Ukraine directly leads to an increase in water temperature in small reservoirs, which in turn contributes to excessive enrichment of water with nutrients, algae development, and, accordingly, eutrophication. In addition, the upward transformation of water temperature, in turn, affects water circulation in reservoirs, thermoclines, and heat redistribution in different layers of water [3, 4, 33].

It is a well-known fact that small reservoirs retain water worse, and an increase in the temperature factor leads to evaporation. In turn, this is one of the reasons for the decrease in water level in this type of reservoir, and accordingly, it has a transformative effect on the aquatic ecosystem as a whole [11].

Scientists have experimentally proved that an increase in temperature leads to a decrease in the solubility of oxygen in small reservoirs, which threatens the extinction and unstable development of certain groups of aquatic

organisms and other living organisms in reservoirs [9, 4]. Therefore, climate change may in the near future completely disrupt the ecological balance of this type of reservoir, which requires additional scientific research.

In [21], it is thoroughly analyzed that temperature fluctuations have a significant impact on the hydrological regime of small reservoirs. An increase in air temperature leads to changes in the outflow and inflow of water, which in turn affects the overall functioning of water bodies of this type.

Compared to other water bodies, artificial small reservoirs are at risk of cumulative impacts of climate change, as evidenced by some scientific studies [2, 11, 20]. The functioning of aquatic ecosystems of various origins is significantly influenced by abiotic factors, in particular, temperature [39]. For a long time, aquatic ecosystems have been undergoing a significant level of transformation, which is associated with significant changes in climatic parameters. During the XXI century, an increase in average annual air temperature has been observed throughout the planet, which also affects changes in the ecological parameters of aquatic ecosystems [18, 32].

Thus, according to regional and global climate models, an assessment of future climate change within Ukraine in the near future was made [36]. According to the relevant climatic zoning, Odesa, Kherson, Mykolaiv, and Zaporizhzhia regions are included in the South of Ukraine and the corresponding climate development scenarios are predicted in terms of temperature until 2100 (Fig. 1).

The selected forecast scenarios are divided into 3 relevant periods: *low-end* (2011 – 2040), *intermediate* (2041 – 2070) and *high-end* (2071 – 2100), and accordingly have different parameters of the temperature factor development (Fig. 1). Given the proposed climate modeling, it can be concluded that under the first, mild scenario, in the near term, the temperature of the south will increase by 1 °C by 2040, and in the long term, i.e. by 2100, it will increase by 2°C. At the same time, if we analyze the severe development scenario, the temperature will increase by 1.4°C in the near term and by 4.9°C in the long term. Given such significant climatic transformations, namely an increase in the average annual air temperature by the end of the twenty-first century, it can be argued that this process is currently and in the near future reflected in the ecological and hydrobiological parameters of aquatic ecosystems. In particular, an increase in the average annual temperature may lead to a decrease in the volume of water bodies, including small reservoirs, due to an increase in evaporation rates; changes in hydrological and hydrobiological regimes, which may negatively affect the overall status of aquatic life [19, 30].

In turn, the generalized data of available weather stations in southern Ukraine, shown in Figure 2, indicate that in the period from 1990 to 2023, the average annual air temperature in the region had peak periods of increase and insignificant periods of decrease. However, the available scientific and analytical materials suggest that in recent decades, there has been an increase in average annual temperature in southern Ukraine [47]. In particular, Figure 2

shows that in 1990 the average annual temperature in southern Ukraine was 11.25 °C, and in 2023 it rose to 12.4 °C.

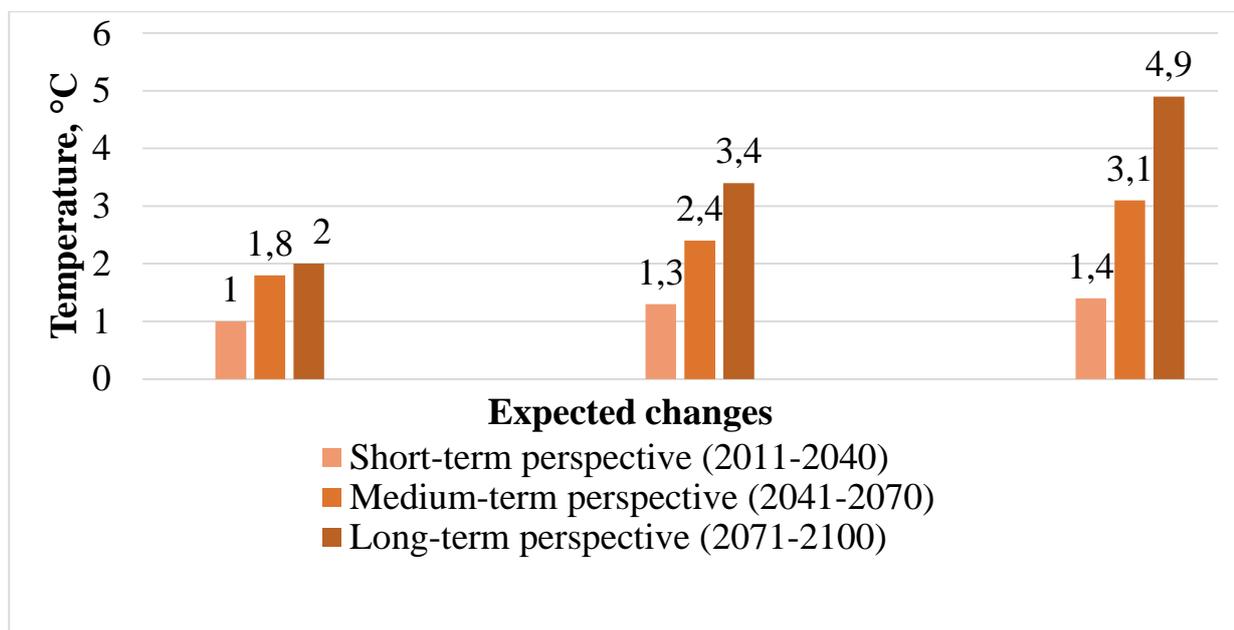


Fig. 1. Expected changes (°C) in the average annual air temperature during the twenty-first century in different regions of Ukraine compared to the reference period [38].

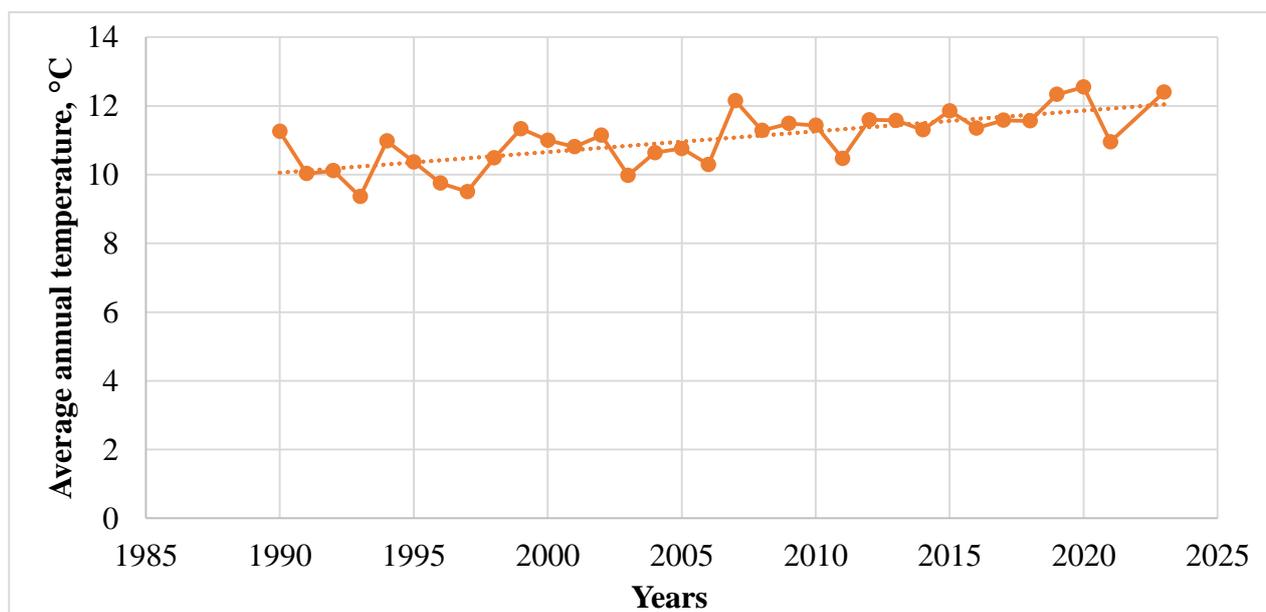


Fig. 2. Dynamics of the average annual change in air temperature in southern Ukraine from 1990 to 2023

Over the period from 1990 to 2023, the amount of precipitation in southern Ukraine has also changed (Fig. 3) [46]. According to data from meteorological stations in southern Ukraine and calculations, the average decrease in precipitation per year is approximately 1.72 mm/year. The trend line shows a general downward trend in precipitation, although there are significant fluctuations between years.

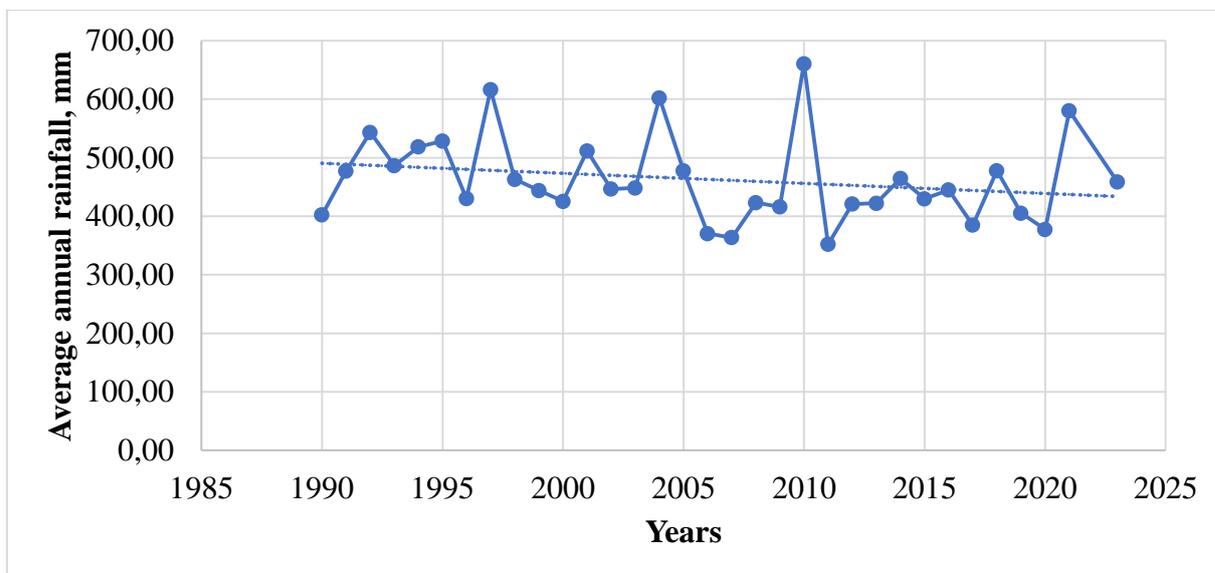


Fig. 3. Dynamics of changes in average annual precipitation in southern Ukraine from 1990 to 2023

Increased temperature and decreased precipitation have different effects on water bodies, including small reservoirs, and determine the peculiarities of their functioning and the interaction of biotic and abiotic factors [28, 42].

Given that the small reservoirs of southern Ukraine are promising objects for fisheries exploitation, a more detailed study of the impact of climate change on these aquatic ecosystems, namely on different trophic levels and the vital activity of aquatic organisms, is needed [44]. A thorough study of biotic and abiotic factors, analysis of experimental studies of hydroecological, hydrochemical and hydrobiological components of the functioning of small reservoirs in southern Ukraine will allow developing scientifically sound mechanisms for the rational use of the fishery and ecological resource potential of small reservoirs in the south, taking into account the trends of modern climate change.

Small reservoirs in southern Ukraine, artificially created water bodies whose primary purpose was irrigation and economic use. Previous studies have shown that these water bodies have a high bioproductive potential, but due to artificially created environmental conditions, these water bodies have a poor species composition of fish fauna, which in most cases is represented by low-value species of aquatic organisms, which are not of significant value for fish farming.

Existing climate change and those expected in the future have a significant impact on the ecological and hydrobiological component of small reservoirs, both in the world [41, 45] and in southern Ukraine, and the productive capacities of this type of reservoir are of significant scientific and practical interest to fisheries science.

The spontaneously formed ichthyofauna of small reservoirs, which is represented by a small diversity of low-value fish species, together with climatic changes, not only does not meet the economic and economic interests of warm-water fish farming, but also poses a significant threat to the ecological state of this type of reservoir.

Given that fish products are one of the main components of the human diet, and Ukraine lags far behind the average annual consumption rate, it is important to grow fish species in small reservoirs that not only have high growth potential but also have optimal dietary and taste qualities, as well as make optimal use of the feed resources available in artificial reservoirs, which tend to increase every year due to temperature transformations.

It should be noted that water bodies are complex systems in which there is a constant interaction of abiotic and biotic factors that not only affect each other but also determine the functioning and structure of aquatic ecosystems.

The abiotic factors of small reservoirs include their physical and chemical parameters, which have a significant impact not only on water quality parameters but also on aquatic life. The key abiotic factors in these reservoirs include light, water temperature, salinity, level and presence of dissolved gases, and water chemistry.

The biotic factors of artificial reservoirs include trophic interactions between living organisms of the reservoir, in particular, such as phytoplankton, zooplankton, macrophytes and fish, which are the basis of food relations in this type of reservoir [8, 31].

Small reservoirs are very vulnerable to changes in abiotic factors due to their limited capacity for self-regulation and small areas. [1] In view of this, the study of the interaction of abiotic and biotic factors is necessary to ensure their sustainable functioning and effective management of their potential.

The key abiotic factor in the aquatic environment of small reservoirs is water temperature. The temperature regime affects the rate of biochemical processes in reservoirs and regulates them, and it also affects the rate of metabolic processes of aquatic organisms [29]. Given the results presented above, we note that with the increase in the average annual air temperature, which is currently observed in the world, the temperature of aquatic ecosystems also increases. It should be noted that the consequences are the acceleration of the decomposition of organic matter in water, which in turn leads to a decrease in the concentration of dissolved oxygen in aquatic ecosystems. These changes have a negative impact on aerobic organisms in small reservoirs and, accordingly, lead to unpredictable changes in trophic chains [28]. Undoubtedly, changes in the temperature factor in small reservoirs also negatively affect the process of fish reproduction, as it can lead to changes in the duration and period of spawning, which, in turn, affects the species composition and population size.

An equally important abiotic factor in the aquatic environment is the presence of sufficient dissolved oxygen. The oxygen regime and the level of dissolved oxygen concentration in these water bodies depends on several factors, including the intensity of photosynthesis, the presence of organic matter, and temperature. Insufficient levels of dissolved oxygen in reservoirs can cause anaerobic conditions that are unfavorable for aquatic life and zooplankton. Anaerobic conditions can lead to stressful conditions and the death of aquatic organisms, which will disrupt trophic chains and the ecological balance of a small reservoir [50].

Phytoplankton productivity and the process of photosynthesis in reservoirs are affected by another indicator – water transparency. Thus, a low level of water transparency, which in most cases is caused by a large amount of inorganic and organic particles, negatively affects phytoplankton biomass and reduces the level of photosynthesis in the reservoir. Conversely, high transparency is a prerequisite for improving photosynthetic activity, which contributes to the development of primary production, namely phytoplankton, which is a source of food for herbivorous fish [48].

Last but not least, the abiotic factor of small reservoirs is the level of nutrient concentration in their waters. Here, the main nutrients are phosphorus and nitrogen, as they determine the level of reservoir productivity. The optimal concentration of nutrients has a positive effect on the aquatic ecosystem's fish fauna, while their excess leads to eutrophication of water, and thus to a decrease in its transparency and dissolved oxygen concentration, which has a negative impact on all levels of the trophic chain in the reservoir [22].

One of the biotic factors of small reservoir waters and the main producer is phytoplankton, which provides the level of development of primary production and is the basis for all other trophic levels. Phytoplankton species in small reservoirs can vary depending on abiotic factors such as temperature, water clarity, and available nutrients. Given that the ecosystem is considered a complex interconnected system, changes in phytoplankton species composition in small reservoirs can affect the reduction of zooplankton biomass [7, 43].

Zooplankton, like phytoplankton, is an integral part of small reservoirs and an important trophic link between predators and phytoplankton. The species composition and abundance of zooplankton depends on abiotic factors such as dissolved oxygen concentration and temperature, as well as on the presence of phytoplankton. Zooplankton is a source of food webs for many fish species in small reservoirs, and it also plays a key role in controlling the abundance of phytoplankton, as it is its main consumer [23].

Fish are the base of the food chain and play important roles in aquatic ecosystems. They control the number of small fish and zooplankton, which in turn affects the entire aquatic ecosystem. Changes in the species composition of fish occur quite often, usually due to the combined effect of abiotic factors, and can disrupt the entire trophic dynamics of a small reservoir [35].

Macrophytes in small reservoirs also play important functions, in particular, they have an impact on water quality through photosynthesis, are a place for fish spawning and a refuge for zooplankton. The presence and development of macrophytes in small water bodies depends on a number of abiotic factors (including light, nutrients, and water temperature). Increasing the level of macrophyte development in reservoirs can increase water clarity, as they reduce the concentration of phytoplankton in the reservoir and absorb excess nutrients [27].

The biotic subsystem of small reservoirs for various purposes has close interrelationships and depends on a number of factors, including: internal processes in these aquatic ecosystems; statistical hydrological processes; water

salinity; and the supply of source species of fish fauna from the predecessor reservoirs [12, 26, 34, 37].

It should be noted that the development of forage resources in small reservoirs in southern Ukraine is uneven, which allows us to divide them into classes according to hydrobiological parameters (table 1). The average seasonal indicators of the forage base for each reservoir are different and can vary widely [15, 17].

The highest hydrobiological indicators are characteristic of Class I reservoirs. Phytoplankton develops very intensively here, with fluctuations in average seasonal biomass ranging from 33.3 to 80.0 g/m³. Also, this class of reservoirs is characterized by prolonged water bloom, which is associated with the intensive development of algae of several systematic groups that replace each other for a long time. At the same time, the average seasonal biomass of zooplankton in these reservoirs ranges from 1.5 to 10 g/m³, depending on the use of breaks and the density of fish stocking. At the same time, the amount of «soft» zoobenthos in these reservoirs can reach 6.2 g/m³.

Table 1. Average long-term indicators of seasonal biomass of forage aquatic organisms in the Steppe zone [17]

Class	Average seasonal biomass of forage aquatic organisms			Area of active fishing
	Phytoplankton, g/m ³	Zooplankton, g/m ³	Zoobenthos, g/m ³	
I	55,0	5,0	3,0	100
II	27,0	1,5	1,5	75
III	10,0	1,0	1,0	50

Small class II reservoirs in the Steppe zone are characterized by moderate phytoplankton development, with low-intensity water blooms observed very rarely. Fluctuations in the average seasonal biomass range from 17.9 to 33.5 g/m³. The average seasonal zooplankton indexes are 1.5 g/m³, but sometimes they can reach 3.0 g/m³. The average seasonal zoobenthos indexes are 1.5 g/m³, but it can often be absent, in particular during the growing season due to its high consumption by benthic fish.

The weakest level of development of forage aquatic organisms is characteristic of class III small reservoirs in the Steppe zone. The level of phytoplankton development in these reservoirs is rather weak with small amplitudes of fluctuations during the seasons – its average seasonal biomass usually does not exceed 10.0 g/m³. Zooplankton in this class of water bodies has a very poor species composition with an average seasonal biomass of 1.0 g/m³. The “soft” benthos in class III reservoirs is also poorly developed and its average seasonal biomass is about 1.0 g/m³ [16, 17].

Given all of the above, we can say that the key factor that determines the ecological state of small reservoirs is the interaction of abiotic and biotic factors.

For example, numerous studies have shown that changes in water temperature can affect the metabolism of zooplankton and fish, which in turn affects their numbers and species composition. Such processes in small reservoirs can cause competition for food resources and transformations in trophic chains. The rapid development of phytoplankton due to high concentrations of nutrients can reduce water transparency and affect the development of macrophytes [24, 49].

The cumulative effect of abiotic factors of the aquatic environment affects the species and number of fish and zooplankton, which affects the control of phytoplankton abundance and can inversely affect the concentration of nutrients and transparency of the aquatic ecosystem [10].

In turn, an increase in average annual precipitation also has a different impact on the abiotic factors of small reservoirs. Thus, an increase in precipitation can affect the ability of reservoirs to retain heat and thermal stratification of water, as it can contribute to a slight cooling of water during periods of intense precipitation. It should be noted that the resulting change in temperature regime may affect the metabolic processes of small reservoirs and their biodiversity. The authors note [13] that an increase in precipitation can be critical for small reservoirs, as it disrupts the ecological stability of their aquatic ecosystem.

Increased precipitation can affect the hydrodynamics and organic matter supply to small reservoirs, which are critical elements that affect the concentration of dissolved oxygen in this type of ecosystem. In view of this, there is a risk of increased hypoxia in reservoirs caused by an increase in the level of organic matter supply and increased eutrophication processes.

Quite often, an increase in precipitation is accompanied by runoff from urbanized areas and agricultural land into small reservoirs, which usually contributes to an increase in phosphates, nitrites, and other chemical compounds [5, 25].

Prolonged and intense precipitation can often cause an increase in water levels and water retention time in small reservoirs, resulting in poor water quality and increased siltation.

In the context of current climate change, the study of biotic and abiotic conditions of small reservoirs in southern Ukraine is important and relevant, as it will help to maintain sustainability, normalize the ecological component of the ecosystem and ensure synergistic development of small reservoirs.

In addition, the abiotic and abiotic components of water bodies will help to develop the technological and economic component of rational and highly productive fisheries management in small reservoirs, which will take into account environmental, climatic, productive and economic factors.

Conclusions. The identified trends show that climate change has a significant impact on aquatic ecosystems, in particular, it leads to changes in the oxygen regime, changes in the dynamics of nutrient supply to water bodies, eutrophication of water bodies and disruption of the ecosystem balance. Available climate forecasts indicate that in the coming decades, the temperature in southern Ukraine may increase by 2-5°C, which will affect the productivity of aquatic ecosystems and the processes that take place in them.

Due to their limited capacity for self-regulation, small reservoirs in southern Ukraine are the most vulnerable to such changes. Such changes can lead to a deterioration in the ecological and hydrobiological state and a decline in fish populations. Given the current realities, the restoration and development of fisheries activities is an important component of sustainable development.

REFERENCES

1. Алхімова Ю. М. Екологічна оцінка стану рибогосподарських ставів при вирощуванні корошових риб у Херсонській області. *Таврійський науковий вісник. Серія: Сільськогосподарські науки*. 2022. № 126. С. 283–289.
2. Вживання риби населенням світу (по доповіді ФАО 2020 р.). URL: <https://fishindustry.com.ua/vzhivannya-ribi-naselennyam-svitu-po-dopovidi-fao-2020-r/> (дата звернення: 30.08.2024)
3. Глебова Ю. А., Шкарупа О. В. Динаміка розвитку рибного господарства України у 2016–2018 роках. *Рибогосподарська наука України*. 2019. № 2ю С. 5-20. Doi: 10.15407/fsu2019.02.005
4. Ємцев В., Слободянюк Н., Ємцева Г. Рибне господарство України: сучасний стан та перспективи відновлення *Наукові інновації та передові технології*. 2022. № 9 (11). С. 314 – 326. Doi: [https://doi.org/10.52058/2786-5274-2022-9\(11\)-314-326](https://doi.org/10.52058/2786-5274-2022-9(11)-314-326)
5. Ковальова І. В. Зміни хімічного складу води у гідроекосистемах різного типу. *Acta Carpathica*. 2023. № 1. С. 28 – 33. Doi: <https://doi.org/10.32782/2450-8640.2023.1.3>
6. Корман І. І. Сучасний стан та перспективи розвитку вітчизняного ринку риби та рибопродуктів. *Підприємництво та інновації*. 2020. № 12. С. 49 – 54. Doi: <https://doi.org/10.37320/2415-3583/12.8>
7. Лошкова Ю. М. Гідробіологічний режим ставів при вирощуванні дволітків корошових як рибопосадкового матеріалу для вселення у пониззя Дніпра. *Таврійський науковий вісник. Серія: Сільськогосподарські науки*. 2014. №. 89. С. 171–175.
8. Лошкова Ю. М., Шевченко В. Ю. Методичні аспекти оцінки розвитку фітопланктону у ставах у процесі вирощування рибопосадкового матеріалу корошових для зариблення природних водойм пониззя Дніпра. *Таврійський науковий вісник. Серія: Сільськогосподарські науки*. 2016. № 95. С. 167-172.
9. Мельниченко, С. Г. Комплексний аналіз водних об'єктів півдня України щодо оцінки їх рибогосподарської експлуатації : дис. . доктора філософії : 207 – Водні біоресурси та аквакультура. Херсон, 2025. 187 с.
10. Мельниченко С. Г. Комплексний аналіз параметрів Степівського водосховища для оцінки можливостей його рибогосподарської експлуатації. *Водні біоресурси та аквакультура*. 2025. № 1 (17). С. 56 – 67. DOI: <https://doi.org/10.32782/wba.2025.1.5>
11. Мельниченко С. Г., Богадзьорова Л. М. Рибне господарство України: тенденції розвитку, проблеми та шляхи вирішення. Водні біоресурси та аквакультура. *Таврійський науковий вісник. Серія: Сільськогосподарські науки*. 2023. № 133. С. 362 – 367. Doi: <https://doi.org/10.32782/2226-0099.2023.133.48>
12. Мельниченко С., Гончарова О., Шевченко В. Оцінка рибогосподарського потенціалу малих водосховищ півдня України на прикладі Єланецького водосховища. *Таврійський науковий вісник. Серія: Сільськогосподарські науки*. 2024. № 137. С. DOI: <https://doi.org/10.32782/2226-0099.2024.137.62>
13. Ромашенко М. І., Гусев Ю. В., Шатковський А. П., Сайдак Р. В., Яцюк М. В., Шевченко А. М., Матяш Т. В. Вплив сучасних кліматичних змін на водні ресурси та сільськогосподарське виробництво. *Меліорація і водне господарство*. 2020. № 1. С. 5-22.

14. Трофимчук А. М., Гриневич Н. Є., Трофимчук М. І., Куновський Ю. В., Бондар О. С., Ткаченко О. В., Савчук О. В. Сучасний стан і тенденції розвитку рибництва в Україні та світі. *Технологія виробництва і переробки продукції тваринництва*. 2021. № 2. С. 123 – 133. Doi: 10.33245/2310-9289-2021-166-2-123-133
15. Хижняк М. І., Кражан С. А., Рудик-Леуська Н. Я., Кутіщев П. С. Біопродуктивність водних екосистем : посібник. Київ: ФОП Ямчинський О.В. 2020. 461 с.
16. Шевченко В. Ю., Кутіщев П. С. Потенційні можливості та аналіз рибогосподарського використання Явкінського водосховища. *Водні біоресурси та аквакультура*. 2021. № 1 (9). С. 127 – 136. DOI: <https://doi.org/10.32851/wba.2021.1.10>
17. Шерман І.М., Краснощок Г.П., Пилипенко Ю.В. та інші. Ресурсозберігаюча технологія вирощування риби в малих водосховищах. Миколаїв : Возможности Киммерии, 1996. 51 с.
18. Bliss A., Hock R., Radić V. Global response of glacier runoff to twenty-first century climate change. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*. 2014. № 119 (4). Pp. 717-730. DOI: <https://doi.org/10.1002/2013JF002931>
19. Brierley A. S., Kingsford M. J. Impacts of climate change on marine organisms and ecosystems. *Current biology*. 2009. № 19 (14). R602-R614.
20. Burgaz M. I., Matvienko T. I., Bezik K. I., Soborova O. M. The current state of fish market in Ukraine. *Ukrainian journal of veterinary and agricultural sciences*. 2019. № 2 (3). Pp. 6-10. Doi: <https://doi.org/10.32718/ujvas2-3.02>
21. Burgaz M. I., Matviienko T. I., Soborova O. M., Bezyk K. I., Kudelina O. Y. The current state of fishing and extracting the living aquatic resources in the Black Sea region of Ukraine. *Ukrainian journal of veterinary and agricultural sciences*. 2019. № 2 (3). Pp. 23-27. Doi: <https://doi.org/10.32718/ujvas2-3.06>
22. Carpenter S. R., Cottingham K. L. Resilience and restoration of lakes. *Conservation ecology*. 1997. № 1 (1). URL: <https://www.jstor.org/stable/26271648> (date of application: 05.09.2024)
23. Dodds W. K. Freshwater ecology: concepts and environmental applications. Elsevier. 2002. <http://surl.li/ueijyw> (date of application: 04.09.2024)
24. González-Salazar C., Stephens C. R., Marquet P. A. Comparing the relative contributions of biotic and abiotic factors as mediators of species' distributions. *Ecological Modelling*. 2013. № 248. Pp. 57-70. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2012.10.007>
25. Hao R., Ning X., Zhou Y., Ma R., Zhang X., Qiu G., Hu R. Inputs of terrestrial dissolved organic matter in dam reservoirs during precipitation: impact on water quality and management. *Natural Hazards*. 2024. № 120 (5). Pp. 4349-4366. Doi: <https://doi.org/10.1007/s11069-023-06358-3>
26. Нонсарова О., Shevchenko V., & Melnychenko S. Aspects of optimization of fisheries exploitation of small reservoirs in southern ukraine on the example of danilivsky reservoir. *European Science*. 2024. 2(sge29-02). Pp. 170–178. DOI: <https://doi.org/10.30890/2709-2313.2024-29-00-011>
27. Jackson D. A., Peres-Neto P. R., Olden J. D. What controls who is where in freshwater fish communities the roles of biotic, abiotic, and spatial factors. *Canadian journal of fisheries and aquatic sciences*. 2001. № 58 (1). Pp. 157-170. Doi: <https://doi.org/10.1139/f00-239>
28. Jeppesen E., Kronvang B., Meerhoff M., Søndergaard M., Hansen K. M., Andersen H. E., Lauridsen T.L., Liboriussen L., Beklioglu M., Özen A., Olesen J.E. Climate change effects on runoff, catchment phosphorus loading and lake ecological state, and potential adaptations. *Journal of environmental quality*. 2009. № 38 (5). Pp. 1930-1941. Doi: <https://doi.org/10.2134/jeq2008.0113>
29. Kishi D., Murakami M., Nakano S., Maekawa K. Water temperature determines strength of top-down control in a stream food web. *Freshwater biology*. 2005. № 50 (8). Pp. 1315-1322. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.2005.01404.x>

30. Mayer T. Interactions of fish, algae, and abiotic factors in a shallow, tropical pond. *Hydrobiologia*. 2020. № 847 pp. 4145–4160. Doi: <https://doi.org/10.1007/s10750-020-04375-y>
31. McQueen D. J., Post J. R., Mills E. L. Trophic relationships in freshwater pelagic ecosystems. *Canadian journal of fisheries and aquatic sciences*. 1986. № 43 (8). Pp. 1571-1581. DOI: <https://doi.org/10.1139/f86-195>
32. Meehl G. A., Washington W. M., Santer B. D., Collins W. D., Arblaster J. M., Hu A., Strand W. G. Climate change projections for the twenty-first century and climate change commitment in the CCSM3. *Journal of climate*. 2006. № 19 (11). Pp. 2597-2616. DOI: <https://doi.org/10.1175/JCLI3746.1>
33. Meyer J. L., Sale M. J., Mulholland P. J., Poff N. L. Impacts of climate change on aquatic ecosystem functioning and health. *Journal of the American Water Resources Association*. 1999. № 35 (6). Pp. 1373-1386. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1999.tb04222.x>
34. Parker S. W., Coleman T. S., Carlson A. K., Fischer J. R. Characterization of fish assemblages in eleven multi-use reservoirs from North Carolina, USA. *Journal of freshwater ecology*. 2023. № 38 (1). DOI: <https://doi.org/10.1080/02705060.2023.2241494>
35. Persson L., Diehl S., Johansson L., Andersson G., Hamrin S. F. Trophic interactions in temperate lake ecosystems: a test of food chain theory. *The American Naturalist*. 1992. № 140 (1). Pp. 59-84. Doi: <https://doi.org/10.1086/285403>
36. Pierce D. W., Barnett T. P., Santer B. D., Gleckler P. J. Selecting global climate models for regional climate change studies. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2009. № 106 (21). Pp. 8441-8446. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.0900094106>
37. Pilipenko Y. V. Ecological-trophic Classification of the Small Reservoirs Used for Different Purposes. *Hydrobiological Journal*. 2010. № 46 (1). Pp. 3 – 11. DOI: [10.1615/HydrobJ.v46.i1.10](https://doi.org/10.1615/HydrobJ.v46.i1.10)
38. Pinna M., Zangaro F., Saccomanno B., Scalone C., Bozzeda F., Fanini L., Specchia V. An Overview of Ecological Indicators of Fish to Evaluate the Anthropogenic Pressures in Aquatic Ecosystems: From Traditional to Innovative DNA-Based Approaches. *Water. Anthropogenic Pressures on Marine Ecosystems*. 2023. № 15 (9). Doi: <https://doi.org/10.3390/w15050949>
39. Poff N. L., Brinson M. M., Day J. W. Aquatic ecosystems and global climate change. *Pew Center on Global Climate Change, Arlington*. 2002. P. 1-36.
40. Prakash S. Impact of Climate change on Aquatic Ecosystem and its Biodiversity: An overview. *International Journal of Biological Innovations*. 2021. № 3 (2). Pp. 312 – 317. DOI: <https://doi.org/10.46505/IJBI.2021.3210>
41. Quevedo-Castro A., Bustos-Terrones Y. A., Bandala E. R., Loaiza J. G., Rangel-Peraza J. G. Modeling the effect of climate change scenarios on water quality for tropical reservoirs. *Journal of Environmental Management*. 2022. № 322. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116137>
42. Raje D., Mujumdar P. P. Reservoir performance under uncertainty in hydrologic impacts of climate change. *Advances in water resources*. 2010. № 33 (3). Pp. 312-326. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2009.12.008>
43. Reynolds C. S. The ecology of phytoplankton. Cambridge University Press. 2006. URL: <http://surl.li/jajmut> (date of application: 04.09.2024)
44. Romanenko V. D. The Dnieper reservoirs, their significance and problems. *Hydrobiological Journal*. 2018. № 54 (3). Pp. 3 – 9. DOI: [10.1615/HydrobJ.v54.i3.10](https://doi.org/10.1615/HydrobJ.v54.i3.10)
45. Sahoo G. B., Schladow S. G., Reuter J. E., Coats R. Effects of climate change on thermal properties of lakes and reservoirs, and possible implications. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*. 2011. № 25. Pp. 445-456. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00477-010-0414-z>

- 46 Semenova I., Vicente-Serrano S. M. Long-term variability and trends of meteorological droughts in Ukraine. *International Journal of Climatology*. 2024. № 44 (6). Pp. 1849-1866. DOI: <https://doi.org/10.1002/joc.8416>
47. Skrynyk O., Aguilar E., Skrynyk O., Sidenko V., Boichuk D., Osadchyi V. Quality control and homogenization of monthly extreme air temperature of Ukraine. *International Journal of Climatology*. 2019. № 39 (4). Pp. 2071-2079. DOI: 10.1002/joc.5934
48. Smith V. H., Tilman G. D., Nekola J. C. Eutrophication: impacts of excess nutrient inputs on freshwater, marine, and terrestrial ecosystems. *Environmental pollution*. 1999. № 100 (1-3). Pp. 179-196. Doi: [https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(99\)00091-3](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(99)00091-3)
49. Stomp M., Huisman J., Mittelbach G. G., Litchman E., Klausmeier C. A. Large-scale biodiversity patterns in freshwater phytoplankton. *Ecology*. 2011. № 92 (11). Pp. 2096-2107. DOI: <https://doi.org/10.1890/10-1023.1>
50. Wetzel R. G. *Limnology: Lake and River Ecosystems*. 2001. Academic Press.

3.3 USE OF COTTON CELLULOSE AS AN ALTERNATIVE RAW MATERIAL IN THE PRODUCTION OF ABSORBENT PAPER GRADES

Liudmyla Andriievskya, Nataliia Marchuk

State University of Trade and Economics, Ukraine
l.andriievskya@knute.edu.ua, n.marchuk@knute.edu.ua

The article substantiates the feasibility of using cotton pulp as an alternative raw material in the production of absorbent paper. The material is characterized by high whiteness (80–90%), strength, softness and low lignin content, which ensures its suitability for the production of absorbent paper. The resumption of cotton cultivation in Ukraine creates the prerequisites for the formation of its own raw material base and reducing import dependence. The use of cotton pulp will contribute to reducing the resource intensity of production, environmental load and increasing the competitiveness of national paper products.

Keywords: *cotton cellulose, absorbent paper, alternative raw materials, pulp and paper industry.*

The pulp and paper industry in modern conditions of development of the national economy acquires the status of a strategically important industry, which determines not only the level of provision of society with printed, sanitary and hygienic and packaging materials, but also significantly affects the dynamics of related sectors of the economic complex. The systematic growth of demand for paper products, which is directly related to the increase in the standard of living of the population, urbanization processes and intensification of production in other industries, determines the need to improve technological approaches and expand the raw material base. Therefore, the issue of finding alternative types of raw materials for the production of paper products is currently quite relevant.

The *main purpose* of this research is to find alternative types of raw materials for the production of various types of paper products, in particular absorbent types of paper.

The *object of research* is cotton cellulose as a raw material for the production of absorbent paper.

The *subject of research* is the properties of cotton pulp intended for the production of absorbent types of paper.

During the research, general scientific *methods* were applied: analysis and synthesis, a systemic approach – methods of logical analysis and generalization of scientific literature were used.

Results

The pulp and paper industry is one of the most resource-intensive sectors of production, as it requires significant amounts of wood, electricity and water. The process of pulp and paper production generates large amounts of liquid and

solid waste, as well as emissions of pollutants into the air and water. Such activities are accompanied by a number of environmental challenges, including massive deforestation and degradation of natural ecosystems, loss of biodiversity, increasing freshwater shortages, and problems associated with waste disposal and recycling processes.

The problem of irrational use of wood raw materials is particularly acute, which leads to depletion of forest resources and a negative impact on the ecosystem as a whole. In addition, traditional pulp production processes are accompanied by a high level of energy and chemical consumption, which complicates waste disposal and requires additional costs for wastewater treatment.

In order to minimize the negative impact on the environment, the modern pulp and paper industry is moving towards sustainable development strategies, which include rational forest management, optimization of water and energy consumption, as well as the implementation of closed-loop technologies. An important direction is the use of alternative types of fibrous raw materials – such as flax, hemp, cotton or secondary fibers (waste paper), which allows to reduce the load on forest ecosystems, reduce the volume of waste and increase the environmental efficiency of paper production [1].

An important factor in the development of this industry is the significant expansion of the range of paper products, which, in turn, has necessitated the integrated use of various types of fibrous raw materials.

In pulp and paper production at the present stage, various types of fibrous semi-finished products are used, which are classified by the nature of origin (coniferous and deciduous wood, annual non-wood plants, synthetic and chemically modified fibers), as well as by the technological features of production and further processing. This group includes unbleached and bleached semi-finished products from primary raw materials, which are manufactured by mechanical, chemical and combined methods, which opens up wide opportunities for optimizing the quality and functional purpose of paper products.

Determining the source and method of obtaining fibrous semi-finished products that are part of the composition of various types of paper and cardboard makes it advisable to conduct a broader study of their properties.

Cellulose is the main structural component of plant cell walls and forms the basis of natural fibers used in the pulp and paper industry. It is a high-molecular polysaccharide formed by chains of β -D-glucopyranose residues connected by β -1,4-glycosidic bonds. This structure provides cellulose with high chemical and thermal stability, as well as the ability to form numerous hydrogen bonds, which determines its unique physical and mechanical properties.

In an aqueous environment, cellulose fibers swell well, which contributes to their partial fibrillation, i.e., division into thinner elementary fibrils. During mechanical or chemical processing, this allows to increase the specific surface area of the fibers, improve their dispersion in an aqueous suspension, and ensure the formation of a denser, more uniform paper structure.

Due to its high hydrophilicity, long polymer chain length and the presence of numerous hydroxyl groups, cellulose forms strong interfiber hydrogen bonds,

which provide high tensile, breaking and tearing strength of the paper sheet. In addition, cellulose fibers are resistant to moderate temperatures and chemical reagents, which allows them to be used in various technological processes of paper and cardboard production. [2].

Despite increasing global attention to the environmental risks associated with certain pulp production technologies, demand for cellulose, a basic fibrous material derived from wood and other cellulosic resources, is showing a steady upward trend. This material is a key raw material in the manufacture of a wide range of everyday paper products, including sanitary products (napkins, towels, toilet paper).

The dynamics of pulp production show a sharp increase in volumes: while in 1961 global production amounted to just over 60 million tonnes, in 2023 it reached almost 200 million tonnes. This trend reflects both the growth of the world population and its increasing consumer needs, and the expanding role of paper materials in global supply chains, especially in the packaging sector [3].

In 2023, the United States of America took the lead among the world's pulp producers for paper, providing about 47 million tons of products. China came in second place with a figure of 29 million tons, followed by Brazil, Canada and Sweden. These countries form the core of the global pulp and paper raw material market, determining the dynamics of international trade and price fluctuations.

In 2023, global paper and board production reached approximately 401 million tons, with packaging products accounting for the leading share in this structure, driven by the intensive development of e-commerce and global logistics networks. [4].

If we talk about cotton pulp, which is used in the production of paper products, we note that the global market for bleached web pulp reached 1.48 billion US dollars in 2023. Experts predict annual growth of this segment by 4.5% from 2024 to 2032.

The production of bleached lint pulp is largely dependent on cotton production. That is, a decrease in cotton production will lead to an increase in cotton prices and, thus, a sharp restriction on the supply of bleached lint pulp to the market. However, securing cotton supplies from other countries such as India, Egypt, etc. During times of crisis can help achieve a significant increase in the size of the market [5].

Thus, a pressing issue for the further development of the pulp and paper industry is the search for alternative types of raw materials for the production of paper products.

Given the geographical location and agroclimatic conditions, the cultivation of certain types of fiber crops traditionally used in the world's pulp and paper industry is limited in Ukraine. In particular, tropical and subtropical plants such as kenaf, jute or bamboo require high temperatures and a long growing season, which makes their industrial cultivation in a temperate climate impossible.

At the same time, a promising direction for the domestic raw material base is the cultivation of cotton (*Gossypium* spp.), which is an important industrial crop and a valuable source of cotton fiber.

Historically, cotton was grown in southern regions of Ukraine, particularly in Kherson, Zaporizhia, and Odesa regions. In the mid-20th century, plantations of this crop yielded stable yields, and the raw materials obtained were used mainly for the needs of light industry and military purposes. However, over time, due to changes in economic priorities, a shortage of irrigation resources, and a reorientation of the agricultural sector to other crops, cotton cultivation was discontinued.

With the beginning of a full-scale military invasion, the question of finding raw materials for the military-industrial complex arose in Ukraine, and cotton began to be considered an important source for the production of explosives (in particular gunpowder). The current experiment takes place against the backdrop of a global gunpowder shortage caused by growing demand and active buying up of cotton pulp by Russia.

In Ukraine, a law was adopted in 2024 that will allow to accelerate the registration of cotton varieties (including genetically modified ones) and stimulate its cultivation in our country [6]. In the same year, several imported cotton varieties were planted in the Odesa region to test their suitability for the production of cotton pulp. The Ministry of Agrarian Policy reported the first positive results of this experiment – cotton ripens successfully in the Ukrainian climate [7].

Today, in the context of the search for alternative sources of cellulose raw materials, the restoration of the process of growing cotton in Ukraine is gaining new significance. Thanks to breeding achievements and changing climatic conditions, prerequisites for growing cotton on an industrial scale appear in the southern and central regions of the country. It should also be noted that the production of explosives (in particular gunpowder) generates a significant amount of cotton waste, which can also be successfully used for the production of paper products. This can contribute to the formation of a national raw material base for the pulp and paper industry, reducing import dependence and developing environmentally friendly production.

Cotton cellulose is cellulose obtained by treating mechanically cleaned cotton fiber with alkali (scouring) followed by bleaching and drying. It is characterized by high chemical purity (the α -cellulose content is up to 99%) and a high degree of polymerization. It is used to obtain cellulose esters, which are used for the production of paper, which is characterized by high strength and chemical purity. [2].

Cotton lint is a cotton cellulose-based material derived from the short fibers remaining on the cotton seed after the longer fibers are removed during the cotton ginning process. It has been used in various industrial applications for over a century due to its unique properties and versatility.

The use of cotton lint dates back to the late 1800s, when they were first produced as a by-product of cottonseed oil production. Initially, they were used as a filler for paper, but over time, their applications expanded to other industries.

Today, cotton lint are an important raw material for the production of paper and cellulose derivatives, as well as a number of bio-based products. Its unique properties, such as high cellulose content, low lignin content and high purity, make it a valuable resource for various applications in modern industries.

Cotton linter pulp is considered an environmentally friendly raw material due to its renewable nature and potential for environmentally responsible production.

The environmental benefits of using cotton linter pulp include its biodegradability and compostability, which means it can break down naturally without leaving harmful residues in the environment. In addition, cotton linter pulp production can generate less waste and emissions than other pulp and paper production methods, which can reduce the industry's environmental impact. [8].

When it comes to papermaking, cotton linter pulp can be a more environmentally friendly option than other types of pulp, such as wood pulp, because it can be produced from waste that would otherwise be disposed of. Additionally, cotton linter pulp can be produced using less water and electricity than wood pulp.

One of the advantages of using cotton lint in the production of cellulose derivatives is the low level of impurities, which reduces the need for purification steps during the production process. In addition, cotton lint can produce derivatives with specific properties that can be adapted to different applications. [9].

We analyzed previous studies that described the process of pulp production for making various types of paper using cotton stalks, which are waste. It was determined that the obtained paper samples were characterized by high strength and whiteness. At the same time, this raw material was relatively cheap and provided the process of recycling agricultural waste [10].

The possibility of using cotton production waste to produce regenerated cellulose fibers (RCF) has also been investigated. It has been found that such fibers have improved mechanical properties compared to fibers made from wood pulp. This is due to the higher degree of polymerization of cellulose obtained in cotton production. [11].

The effect of combining cotton linter pulp with cellulose nanofibers on paper properties was established. Samples with different cellulose nanofiber contents were evaluated for morphological, mechanical, barrier and optical parameters. It was found that the addition of cellulose nanofibers increases the density and strength of paper, as well as improves water and air permeability. At the same time, a decrease in the whiteness index is observed. The results confirm the suitability of cotton linter for the production of high-quality special paper and the effectiveness of using cellulose nanofibers as an ecological structure modifier [12].

The use of biopolymer additives based on cottonseed protein isolate and lignin-containing cellulose nanofibers (LCNF) as an environmentally friendly alternative to petrochemical modifiers in paper production was investigated. It was found that the treatment of filter paper with a 10% protein solution with 2% LCNF significantly increased the tensile strength, elongation at break and elastic

modulus. The best results were obtained for samples with higher lignin content and degree of polymerization, confirming the effectiveness of combined biopolymer systems in strengthening paper materials [13].

Paper samples obtained in laboratory conditions based on cotton cellulose and synthetic fiber waste of various thicknesses were studied. The dependence of the physical and mechanical properties of experimental paper samples on the linear density of synthetic fibers was established. It is noted that the use of synthetic fibers with a lower linear density improves the paper forming process [14].

That is, all of the above studies confirm the feasibility of using cotton pulp for the production of various types of paper.

The quality of absorbent paper is usually determined and depends on the quality of fibrous semi-finished products – on the type of cellulose, the degree and conditions of their grinding, technological parameters, the processes of pouring the fibrous suspension and forming the paper web.

In the course of our previous studies [15], it became necessary to achieve increased absorbency, fluffiness, and whiteness of absorbent paper types while maintaining the required level of mechanical strength that ensures the conditions for its intended use. In this study, eucalyptus wood cellulose was proposed as an alternative raw material.

We have determined that absorbent paper must have the necessary set of properties, be characterized by sufficient absorbency, softness and fluffiness, as well as appropriate mechanical strength to ensure the manufacturability of its processing into products, goods, etc., the conditions of their use and operation. In addition, products made from such paper must have an attractive appearance, that is, be characterized by an appropriate whiteness indicator.

Given the relevance of using cotton cellulose in the composition of absorbent types of paper, a comparison of its properties with other types of plant raw materials was carried out (Table 1).

As can be seen from the presented data, the ratio of fiber length to width in annual plants is the same as in wood (except for bast fibers of flax, hemp, cotton and ramie). For most representatives of annual plants, the length of stem fibers is close to the length of hardwood fibers and is smaller than the length of coniferous fibers and cotton fibers. In terms of fiber width, annual plants are somewhat inferior to hardwood fibers and are 2-3 times thinner than coniferous fibers.

Softwoods, flax and ramie exhibit significantly greater lengths than annual stem crops (straw, reed, kenaf, cotton). Long fibers contribute to the formation of such paper properties as tensile strength, tear resistance and preservation of the structural integrity of the sheet. These indicators are important for paper types where high mechanical strength is required, such as printing paper. For absorbent paper types, fluffiness and softness are important characteristics, so short fibers, in particular cotton fibers, are best suited for these tasks. It should also be noted that thin cotton fibers provide a larger specific area per unit mass, which potentially increases the absorbency of the resulting paper and improves the process of forming the paper web.

Table 1. Comparative characteristics of cellulose fiber properties from different plant raw materials [2]

№	Type of raw material	Length, mm, L	Width, mcm,W	Length:width ratio, L:W	Whiteness, %	Mass fraction, %	
						Cellulose	Lignin
1	Softwood	1,3-5,6	17-47	76-120	50-60	49-58	26-30
2	Hardwood	0,8-1,7	17-45	40-80	35-45	48-50	20-22
3	Straw of rye, wheat, rice	0,2-1,4	10-19	35-74	40-50	47-49	23-25
		0,3-2,0	10-17	20-110			
		0,3-0,9	10-15	30-82			
4	Linen: chaff, bast fibers	0,3-1,0	14-18	30-50	30-40	72-83	1,7-3,2
		9-70	5-38	200-1800			
5	Hemp	5-55	15-28	35-870	55-70	72-78	2,4-5,3
6	Cane	0,5-1,2	15-16	45-90	45-55	35-62	10-25
7	Kenaf	0,7-5	20-22	55-100	50-60	30-65	12-24
8	Cotton	0,8-1,9	18-20	40-100	75-85	84-90	0-1,0
9	Cotton fiber	3-100	12-38	180-1500	80-90	84-98	0-0,3
10	Rami	620	40-80	7000-15000	50-65	68-91	0,6-0,7

The length to width ratio (L:W) is characterized by the highest values in ramie (7000–15000) and cotton (180–1500). This is an indicator that indicates the possibility of forming paper with high mechanical strength and good elasticity.

For absorbent paper types, where characteristics such as fluffiness, absorbency and minimum requirements for high tensile strength are simultaneously important, it is optimal to use fiber mixtures: short and thin fibers (in particular cotton fibers) and long wood cellulose fibers (to maintain basic mechanical strength).

The high cellulose content of cotton (84–98%), ramie, flax bast fibers, and hemp means that there is minimal need for delignification and bleaching. This means that the resulting paper will have high whiteness and purity, which is very important for sanitary and hygienic paper types.

Cotton fibers are also characterized by a low content of lignin, which is an undesirable impurity and complicates chemical processing, increases reagent and energy requirements, and reduces the natural whiteness of the paper.

It has been established that the highest whiteness rates are found in cotton (80–90%), cotton (75–85%) and bast fibers (60–75%). This makes them ideal for the production of napkins, towels, toilet paper, where aesthetic properties are quite important. Wood raw materials have moderate whiteness (35–60%), straw and reed – lower; their use in pure form requires significant bleaching to achieve acceptable whiteness.

Thus, after conducting preliminary research, we determined the feasibility of using cotton cellulose for the production of absorbent types of paper. At the

same time, the possibility of obtaining paper that would have a complex of such properties as softness, good absorbency, high whiteness, and the necessary mechanical strength to ensure the technological process of its production was noted.

Conclusions. The study confirmed the high potential of using cotton cellulose as an alternative fibrous material in the production of absorbent paper. Due to its properties, namely high chemical purity, whiteness, degree of polymerization and low lignin content, the use of cotton cellulose will provide the possibility of forming paper with excellent indicators of strength, softness and absorbency. Compared with traditional wood pulp, this material is characterized by better environmental parameters, in particular, rapid biodegradability, reduced waste and reduced energy and water consumption in the production process.

The use of cotton linter pulp, obtained both from the main raw material and from textile waste, opens up new opportunities for the production of paper products and increasing the environmental efficiency of the pulp and paper industry. The results of modern research confirm the possibility of producing high-quality types of paper for various purposes from cotton pulp using cellulose nanofibers and biopolymer additives that improve the mechanical and barrier characteristics of the material.

The resumption of cotton cultivation in Ukraine could be an important step towards creating a national raw material base, reducing import dependence, and forming a sustainable, environmentally friendly paper production. This will contribute not only to increasing the competitiveness of Ukrainian paper products, but also to implementing strategies for a «green» economy and resource-efficient development.

REFERENCES

1. Study of areas of application of cotton pulp. URL: <https://paper-pulper.com/the-applications-of-cotton-linter-pulp/>
2. Паперові пакувальні матеріали: монографія / В.А. Осика, Л.А. Коптюх. – Київ: Київ. Нац. Торг.-екон. Ун-т, 2017. – 441 с.
3. Global pulp industry – statistics & facts. URL: <https://www.statista.com/topics/7345/pulp-industry/#topicOverview>
4. Leading pulp for paper producing countries worldwide in 2023. URL: <https://www.statista.com/statistics/1333386/pulp-for-paper-production-by-country/>
5. Bleached Linter Cellulose Market – By Grade (High, Technical), By Application (Viscose, Acetate, Ethers, Nitrate), By End-user, Competitive Market Share & Forecast, 2024-2032. URL: <https://www.gminsights.com/industry-analysis/bleached-linter-cellulose-market>
6. Про внесення змін до деяких законів України щодо поширення сортів бавовнику в Україні (Відомості Верховної Ради (ВВР), 2024, № 29, ст.205). URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/3645-IX#Text>
7. В Україні хочуть відродити вирощування бавовнику, з якого виробляють порошок. Яку площу треба засіяти і де? URL: <https://latifundist.com/spetsproekt/1074-v-ukrayini-hochut-vidrodit-viroshchuvannya-bavovniku-z-yakogo-viroblyayut-poroh-yaku-ploshchu-treba-zasiyati-i-de>

8. Exploring the applications of cotton linter pulp. URL: <https://paper-pulper.com/the-applications-of-cotton-linter-pulp/>
9. Bajpai, P. Pulp and Paper Industry: Chemistry and Chemical Technology, Elsevier, 2018. URL: <https://shop.elsevier.com/books/pulp-and-paper-industry/bajpai/978-0-12-803408-8>
10. Pandey, S. N., Shaikh, A. J. Utilisation of cotton plant stalk for production of pulp and paper // *Biological Wastes*, 1987. Volume 21, Issue 1. P. 63-70. [https://doi.org/10.1016/0269-7483\(87\)90147-9](https://doi.org/10.1016/0269-7483(87)90147-9)
11. De Silva R., Byrne N. Utilization of cotton waste for regenerated cellulose fibres: Influence of degree of polymerization on mechanical properties // *Carbohydrate Polymers*. – 2017. – Vol. 174. – P. 89–94. – DOI: 10.1016/j.carbpol.2017.06.042.
12. Bharimalla A. K., Patil S., Dhakane-Lad J., Mahawar M. K., Nadanathangam V., Kautkar S. Blending of cellulose nanofibers with cotton linter pulp to enhance the mechanical and barrier properties of paper. *Sci Rep* 15. 2025. – DOI: 10.1038/s41598-025-96213-1
13. Jordan J. H., Easson M. W., Cheng H. N., Condon B. D. Application of lignin-containing cellulose nanofibers and cottonseed protein isolate for improved performance of paper // *Polymers*. – 2022. – Vol. 14 (11). – DOI: <https://doi.org/10.3390/polym14112154>
14. Eshbaeva U. Zh., Ismailova G., Saodatov A. Offset paper production technology based on cotton cellulose and synthetic fiber waste // *Solid State Technology*. – 2020. – Vol. 63, No. 6. – URL: <https://solidstatetechnology.us/index.php/JSST/article/view/6188>
15. Andriievska, L., Komakha, V., Merezhko, N., Kaluha, N., Marchuk, N. (2025). Application of eucalyptus wood cellulose in the composition of absorbent types of paper. In: Silva, F.J.G., Ivanov, V., Pinto, A.M.G., Sales-Contini, R.d.C.M. (eds) *Advances in Design, Simulation and Manufacturing VIII. DSMIE 2025*. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-96413-8_10

3.4 СИСТЕМНИЙ ПІДХІД У ФОРМУВАННІ ЕКОЛОГІЧНОГО ФАКТОРУ ВИКОРИСТАННЯ БАРВНИКІВ В ЛЕГКІЙ ПРОМИСЛОВОСТІ

Жалдак М. П.¹, Полюга В. О.¹, Мокроусова О. Р.^{1,2}

¹Державний торговельно-економічний університет, Україна

²Київський національний університет технологій та дизайну, Україна
m.zhaldak@knute.edu.ua

У роботі здійснено комплексний аналіз ринку барвників для текстильної та шкіряної промисловості, визначено ключові аспекти їх класифікації, розкрито негативний екологічний вплив та окреслено стратегії екологізації щодо застосування барвників у легкій промисловості. Особлива увага приділяється класифікації барвників за хімічною структурою та технічними властивостями. Визначено, що екологічна шкода синтетичних барвників полягає у скиданні значної кількості токсичних сполук у стічні води. Окреслено шляхи вирішення проблеми, включаючи впровадження ефективних технологій очищення та оптимізацію процесів фарбування.

Ключові слова: *барвник, класифікація, текстильна галузь, шкіряна промисловість, екологія.*

Легка промисловість відіграє стратегічно важливу роль в економіці будь-якої країни, оскільки вона є значним джерелом створення робочих місць, забезпечуючи зайнятість великої кількості населення, особливо в регіонах. Цей сектор безпосередньо впливає на соціальну стабільність і добробут громадян, виробляючи товари першої необхідності (одяг, взуття, текстиль), тим самим задовольняючи внутрішній споживчий попит. Крім того, легка промисловість має високий експортний потенціал, сприяючи збільшенню валютних надходжень та покращенню торговельного балансу країни, а її розвиток стимулює інновації та модернізацію суміжних галузей, формуючи додану вартість та підвищуючи загальну конкурентоспроможність економіки на світовому ринку.

Текстильна та шкіряна промисловість мають особливе, ключове значення у структурі легкої промисловості та економіки загалом, оскільки вони виступають основою для подальшого виробництва більшості кінцевих продуктів. Текстильна промисловість є провідною підгалуззю за вартістю виробленої продукції, оскільки вона виробляє тканини, волокна та нитки – базову сировину, критично необхідну не лише для швейної, але й для багатьох суміжних галузей, а її розвиток безпосередньо підвищує конкурентоспроможність всього вітчизняного виробництва товарів народного споживання та стимулює інновації у матеріалознавстві. Водночас, шкіряна, хутрова та взуттєва промисловість є другою за значимістю, займаючись глибокою переробкою сировини (шкіри), що

створює високу додану вартість, забезпечує значну зайнятість населення та формує взуттєву промисловість, яка постачає важливі споживчі товари і має потужний експортний потенціал. Таким чином, ці дві підгалузі виступають фундаментом, на якому базується вся легка промисловість, забезпечуючи її сировиною, робочими місцями та більшою частиною товарної продукції.

Використання барвників має критично важливе значення для текстильної та шкіряної промисловості, оскільки воно виходить далеко за межі простого надання кольору, безпосередньо впливаючи на якість, конкурентоспроможність та естетичну привабливість кінцевого товару. Колір є першим фактором, що впливає на рішення споживача, дозволяючи диференціювати продукцію на ринку, відповідати актуальним модним трендам, формувати асортимент і забезпечувати впізнаваність бренду завдяки яскравим, стійким та різноманітним відтінкам. Якісні барвники значно підвищують експлуатаційні характеристики матеріалів, забезпечуючи довговічність кольору та його стійкість до світла, прання чи тертя, що є ключовим показником якості товару. У шкіряній промисловості важливою є здатність барвників глибоко проникати у волокна для рівномірного та насиченого забарвлення. Вибір барвників повинен бути сумісним із типом волокон, забезпечуючи оптимальну фіксацію, а сам процес фарбування часто поєднується з хімічною обробкою для надання додаткових функціональних властивостей. У сучасному світі важливим є використання безпечних та екологічно чистих барвників, що не містять важких металів та токсичних сполук, оскільки це є вимогою як світових стандартів, так і соціальної відповідальності виробників.

Барвники – це органічні сполуки, що відрізняються здатністю інтенсивно поглинати та перетворювати енергію електромагнітних випромінювань, зокрема світла, а також променів у ближніх ультрафіолетовій та інфрачервоній областях спектра [1]. Кольоровими ці речовини стають завдяки поглинанню частини світлових променів певної довжини хвилі у видимому діапазоні. Залежно від характеру перетворення поглиненої енергії, ці сполуки використовуються не лише для надання кольору матеріалам (власне, як барвники), але й для надання їм люмінесцентних властивостей (здатності світитися), або ж для впливу на фотохімічні процеси – підвищення чи зниження світлочутливості фотоматеріалів, виконуючи роль оптичних сенсориалізаторів або десенсибілізаторів [1].

Проблеми використання барвників у легкій промисловості досліджували ряд вітчизняних та закордонних науковців. Бондарєва А.О. [2] досліджувала особливості застосування гібридних пігментів у формуванні полімерно-мінерального покриття для оздоблення шкір. Касьян Е.Є. досліджував моделювання показників якості покриття шкір шляхом оптимізації складу покривної композиції на основі плівкоутворювачів різної хімічної природи та барвника [3]. Арабулі С.І. [4] досліджувала особливості практичного застосування кубових барвників

для функціоналізації бавовняних тканин. Мадані М.М. [5] досліджувала деструкцію барвників у стоках текстильних виробництв. Т. Younas, N. Taouaba, A. Ayub та Sh. Ali [6] розглянули різні види барвників, їх переваги та недоліки. R. Altohamy, S. Samir Ali, K. Okasha та F. Li [7] здійснили критичний огляд очищення стічних вод, що містять барвники, зокрема екотоксикологічні та медичні проблеми текстильних барвників, а також можливі підходи до відновлення для екологічної безпеки.

На основі вищезазначеного аналізу встановлено відсутність комплексних та глибоких наукових досліджень, які стосувалися б систематизації інформації щодо статистичного аналізу ринку та класифікації барвників, що використовуються в легкій промисловості. Це суттєво гальмує розвиток відповідних підгалузей. Тому постає необхідність у проведенні ґрунтовної роботи, спрямованої на дослідження обсягів виробництва вітчизняних барвників, детальний аналіз експортно-імпортних операцій для виявлення залежності від зовнішніх постачальників. Також необхідною є класифікація та систематизація асортименту барвників (включно з їхніми хімічними властивостями та сферами застосування), які наразі використовуються у шкіряній та текстильній промисловості. Таке дослідження забезпечить необхідну інформаційно-аналітичну базу для прийняття ефективних управлінських рішень, розробки стратегій імпортозаміщення та підвищення екологічної безпеки виробництва.

Мета – обґрунтування класифікації барвників та їх ролі у забезпеченні світового ринку галузі легкої промисловій для формування системного підходу екологізації шкіряного та текстильного виробництв.

Об'єктом дослідження є барвники, що використовуються у текстильній та шкіряній промисловості.

Предмет дослідження – систематизація, класифікація та аналіз ринкових особливостей застосування барвників (включаючи обсяги виробництва, імпортно-експортні операції, асортимент і якісні характеристики) у ключових підгалузях легкої промисловості України, зокрема текстильній та шкіряній.

Методи та матеріали

Дослідження ринку відбувалось шляхом аналізу статистичних баз даних Державної служби статистики України та Державної митної служби України. Систематизація класифікації барвників для шкіряної та текстильної промисловості відбувалась з використанням загальноприйнятих методів синтезу та аналізу.

Виклад основного матеріалу

У структурі легкої промисловості (ЛП) України текстильна та шкіряна промисловість є стратегічно важливими підгалузями, які формують основну сировинну базу та випускають товари першої необхідності. Якість і ринкова привабливість їхньої продукції (одяг, взуття, текстиль) безпосередньо залежать від використання барвників, які надають товарам необхідних естетичних властивостей, кольоростійкості та

функціональності. Втім, незважаючи на критичне значення цього хімічного компонента, вітчизняний ринок барвників характеризується високою імпортозалежністю та відсутністю комплексних наукових досліджень щодо обсягів виробництва, споживання, імпортно-експортних операцій, а також чіткої класифікації та систематизації барвників.

Розглянемо структуру експорту світового ринку барвників у 2023 році. Карта має кольорове кодування, що відображає відсоткову частку синтетичних барвників у загальному експорті кожної країни. Наприклад, значення 10% вказує на те, що 10% загального експорту країни складають синтетичні барвники. Темніші відтінки позначають країни, які більше залежать від цієї категорії продуктів для своїх експортних доходів.

У 2023 році країнами з найбільшою часткою синтетичних барвників у своїх експортних портфелях були Індія (0,53%), Кокосові (Кілінгові) острови (0,17%) та Гондурас (0,16%) (рис. 1).

Східна Азія та Південна Азія є найбільш виділеними регіонами. До країн з найвищими показниками (темно-помаранчевий колір) відносяться Китай та Індія, що свідчить про їхню ключову роль як світових виробників та експортерів синтетичних барвників. Також у цій категорії високих показників знаходиться Південна Корея. Низка країн Європи, зокрема Італія, Німеччина, Франція та Іспанія, демонструють помітну, але не домінуючу частку експорту барвників. У Північній Америці до цієї групи потрапляють США (частка експорту барвників у загальному експорті є помітною).

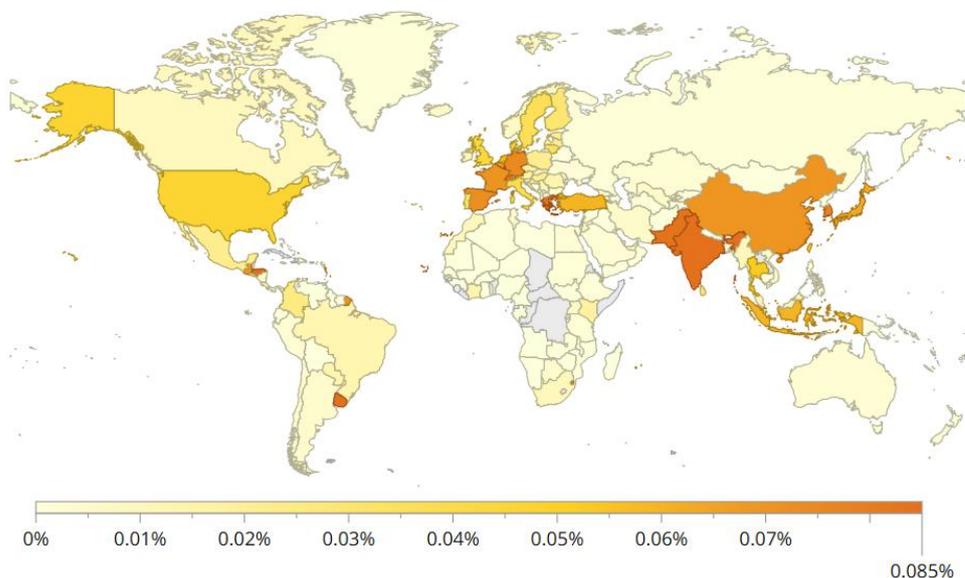


Рис. 1. Співвідношення обсягів експорту барвників до загального обсягу експорту країн у 2023 році

На Близькому Сході виділяється Туреччина. У Південній Америці виділяється Бразилія.

Більшість країн світу, включаючи Канаду, Австралію, країни Африки, Латинської Америки та Східної Європи (включаючи Україну, доля експорту барвників якої відповідає частці близько 0% – 0.01%),

мають дуже низьку частку експорту синтетичних барвників у своєму загальному товарному експорті.

Рис. 1 демонструє, що у 2023 році виробництво та експорт синтетичних барвників, як значної частки національного експорту, були найбільше сконцентровані в країнах Азії, особливо в Китаї та Індії. Це підтверджує їхню роль як основних світових гравців у цій галузі. Країни Європи та США також відіграють певну роль, але частка цього товару в їхньому загальному експорті є значно нижчою. Враховуючи значну виробничу потужність шкіри в Китаї та Індії, можна відслідкувати високий рівень виробництва та експорту в цих країнах барвників для шкіри, які в основному є кислотними, оскільки надають яскраві та насичені кольорові рішення. У 2024 році кислотні барвники лідирували на ринку світу, генеруючи дохід у розмірі 1,6 мільярда доларів США [8].

У 2024 році на Північну Америку припадало 22% світового ринку барвників для шкіри. Розвинений ринок регіону характеризується сильним акцентом на якість та сталий розвиток. Автомобільний та меблевий сектори вносять значний внесок у попит на барвники для шкіри, з акцентом на високопродуктивні та екологічно чисті продукти. Досягнення в технологіях та підвищення обізнаності споживачів про переваги екологічно чистих барвників додатково підтримують зростання ринку в Північній Америці [8].

У 2024 році Європа займала 29% світового ринку барвників для шкіри. Багата культурна спадщина регіону та процвітаюча індустрія моди стимулюють попит на високоякісні, екологічно чисті барвники для шкіри. Такі країни, як Італія та Франція, відомі своїми розкішними шкіряними виробами, роблять акцент на сталому розвитку та майстерності, що підживлює ринковий попит. Інтеграція передових технологій фарбування та сталих практик має вирішальне значення для підтримки конкурентної переваги та сприяння зростанню на європейському ринку [8].

Азіатсько-Тихоокеанський регіон лідував на світовому ринку барвників для шкіри з часткою 38% у 2024 році. Домінування регіону пояснюється наявністю великих країн-виробників шкіри, таких як Китай та Індія, які можуть похвалитися значними виробничими потужностями та великими споживчими ринками. Швидка індустріалізація, урбанізація та зростання доходів населення стимулюють попит на шкіряні вироби, тим самим підживлюючи ринок барвників. Крім того, підтримуючі урядові ініціативи, технологічний прогрес та інвестиції в дослідження та розробки ще більше сприяють лідерству регіону на ринку [8].

У 2024 році на регіон Близького Сходу та Африки припадало 4% світового ринку барвників для шкіри. Ринок регіону характеризується зростаючим попитом на шкіряні вироби в різних секторах, включаючи моду та автомобілебудування. Однак ринок стикається з такими викликами, як обмежені виробничі можливості та економічні фактори, які можуть вплинути на зростання. Незважаючи на ці виклики, регіон пропонує можливості для розширення ринку шляхом інвестицій в

інфраструктуру та технології [8].

Основними торговельними марками барвників для шкіри в світі є:

- Archroma (Швейцарія);
- Huntsman (США);
- Eksoy (Туреччина);
- Everlight Chemical (Тайвань);
- BEZEMA, SetaColor Center (Франція);
- Kiri Industries, Atul, Jay Chemicals, Anand International, Colourtex, Bodal Chemical, Aarti Industries (Індія);
- LonSen, Runtu, Jihua Group, Transfar, Hubei Chuyuan, Tianjin Hongfa, YaBuLai Dyestuff, Yabang, Linfen Dyeing, Dalian Dyestuffs, ANOKY, Tianjin Dek Chemical (Китай);
- Nippon Kayaku, Sumitomo, Osaka Godo (Японія);
- The Kyung-In Synthetic Company (KISCO) (Північна Корея) [8].

На світовий ринок текстильних барвників впливає швидка урбанізація та зростання інфраструктурних проектів. Відповідно до цього, прогрес у технології фарбування текстилю та зростаючий попит на енергоефективні та екологічно чисті продукти стимулюють зростання ринку. Це також підкріплюється зростанням обізнаності про екологічно чисті матеріали та зростанням доходів населення, що стимулює попит на високоякісний, естетично привабливий текстиль. Крім того, стрімке зростання сектору нерухомості, а також розвиток інноваційних технологій у ЛП ще більше стимулюють зростання ринку [9].

Глобальний ринок текстильних барвників збільшується від зростання обізнаності про екологічно чисті та стійкі текстильні матеріали. Споживачі та промисловість усвідомлюють важливість впровадження стійких практик у текстильному виробництві. Ця підвищена обізнаність призвела до сплеску попиту на текстиль, пофарбований екологічно відповідальними методами та матеріалами. Споживачі зараз більш схильні обирати текстиль, який не містить шкідливих хімічних речовин і має мінімальний вплив на навколишнє середовище. Як результат, зростає перевага текстилю, пофарбованому з використанням натуральних та біорозкладних барвників. Ці барвники, отримані з таких джерел, як рослинні екстракти, зменшують екологічний слід текстильного виробництва. Крім того, в усьому світі впроваджуються правила та стандарти, що сприяють сталому виробництву текстилю, заохочуючи виробників текстилю застосовувати екологічно чисті процеси фарбування. Оскільки свідомість споживачів та регуляторний тиск продовжують стимулювати попит на стійкі текстильні барвники, ринок реагує, пропонуючи ширший асортимент екологічно чистих рішень для фарбування [9].

Глобальний ринок текстильних барвників у 2024 році оцінювався в 12,42 млрд доларів США. Зростаючий попит в Азіатсько-Тихоокеанському регіоні є ключовим фактором світового ринку текстильних барвників. Швидко розвивається текстильна промисловість регіону в поєднанні зі зростанням доходів населення стимулює безпрецедентне зростання. За

даними Світової організації торгівлі (СОТ), на Азіатсько-Тихоокеанський регіон припадає понад 60% світового експорту текстилю, причому лідирують Китай (34,8%), Індія (7,6%) та В'єтнам (6,2%). Це домінування безпосередньо впливає на споживання барвників, суттєво впливаючи на світовий ринок [10].

Китай, головний гравець у текстильній промисловості, є прикладом цієї тенденції. Китайська асоціація виробників барвників повідомила, що у 2020 році країна використала 1,1 мільйона тонн текстильних барвників, що становить 45% світового попиту. Це величезне споживання підкреслює критичну роль Китаю на світовому ринку текстильних барвників. Ринок барвників Індії є не менш потужним. За даними Міністерства текстилю Індії, виробництво барвників у країні досягло 260 000 тонн у 2021 році, з річним темпом зростання 8,5%. Це стабільне зростання відображає розширення текстильного сектору Індії та зростаючий попит на текстильні барвники. Таким чином, провідна роль Азіатсько-Тихоокеанського регіону у світовому експорті текстилю та його значне споживання барвників є ключовими рушійними силами світового ринку текстильних барвників [10].

Світовий ринок текстильних барвників стикається зі значними обмеженнями через суворі правила та норми, встановлені різними урядами та регуляторними органами. Суворі правила регулюють використання певних барвників та їх утилізацію, створюючи перешкоди для гравців галузі. Наприклад, Агентство з охорони навколишнього середовища США (EPA) встановило суворі обмеження на скидання барвників та інших забруднюючих речовин з текстильних фабрик. Недотримання цих правил може призвести до серйозних штрафів, які станом на 2023 рік сягають 54 833 доларів США на день. Такі суворі регуляторні рамки збільшують операційні витрати та складність, що ускладнює для компаній підтримку прибутковості, дотримуючись екологічних стандартів [10].

Сегмент екологічно чистих барвників швидко набирає обертів у текстильній промисловості. Відомо, що традиційні процеси фарбування споживають велику кількість води та виділяють шкідливі хімічні речовини, що значною мірою сприяє забрудненню навколишнього середовища. За даними Світового банку, фарбування та обробка текстилю становлять до 20% промислового забруднення води в усьому світі. У відповідь очікується зростання попиту на екологічно чисті барвники. Крім того, розробка натуральних барвників, отриманих з рослин, комах та мінералів, які є біорозкладними та нетоксичними, ще більше стимулює зростання ринку [10].

ColorZen (США) є початківцем у сфері технологій попередньої обробки, які зменшують використання води та енергії під час фарбування бавовни до 90%. Крім того, використання технології цифрового друку у фарбуванні було пропаговано, оскільки вона вимагає менше води та утворює мінімум відходів. Такі бренди, як Patagonia (Аргентина) та Stella McCartney (Великобританія), є лідерами, впроваджуючи екологічно чисті методи фарбування, зменшуючи свій вплив на навколишнє середовище, одночасно

задовольняючи споживчий попит на більш екологічні продукти. Отже, за оцінками, ці фактори створюють можливості для зростання ринку [10].

Азіатсько-Тихоокеанський регіон є найважливішим акціонером світового ринку. Це домінування можна пояснити високорозвиненою текстильною промисловістю регіону, рушійною силою якої є такі країни, як Китай, Індія, Бангладеш та В'єтнам. Китай є найбільшим виробником і споживачем текстильних барвників у світі. Виробництво текстильних барвників у країні у 2024 році досягло 1,1 млн. тон, що становить приблизно 60% світового виробництва [10].

Індія виробила близько 280 000 тон текстильних барвників у 2024 році. Крім того, домінування Азіатсько-Тихоокеанського регіону на ринку текстильних барвників ще більше підживлюється наявністю численних центрів текстильного виробництва, низькими витратами на робочу силу та сприятливою державною політикою. Наприклад, ініціатива уряду Індії «Зроблено в Індії» спрямована на сприяння вітчизняному виробництву текстилю та барвників, тоді як 14-й п'ятирічний план Китаю робить акцент на розробці високоякісних барвників та екологічно чистих процесів фарбування [10].

Європа є субдомінуючим регіоном на світовому ринку текстильних барвників, на який припадає приблизно 25% від загальної частки ринку. Текстильна промисловість регіону, особливо в Італії, Німеччині та Великій Британії, стимулює попит на текстильні барвники. У цих країнах є велика кількість виробників текстилю, що збільшує попит на текстильні барвники. Крім того, суворі екологічні норми Європи та акцент на сталому розвитку призвели до зростання попиту на екологічно чисті та органічні барвники [10].

Наприклад, регламент Європейського Союзу REACH (реєстрація, оцінка, авторизація та обмеження хімічних речовин) [11] мав значний вплив на ринок текстильних барвників, обмежуючи використання певних небезпечних барвників та сприяючи впровадженню безпечніших альтернатив. Регламент REACH [11] призвів до значного скорочення використання небезпечних барвників, таких як азобарвники, які, як відомо, спричиняють проблеми з навколишнім середовищем та здоров'ям. Крім того, такі ініціативи, як екомаркування ЄС та система Bluesign [12], заохочували виробників текстилю використовувати стійкі методи фарбування та екологічно чисті барвники. Таким чином, очікується, що такі ініціативи сприятимуть попиту на екологічно чисті та органічні текстильні барвники в регіоні, що згодом підживлюватиме європейський ринок текстильних барвників [10].

Основними торговельними марками барвників для текстилю в світі є: Archroma Management GmbH (Швейцарія), ТОВ «Атул» (група Лалбхай), Корпорація Хантсмен, JAY Chemical Industries Limited, Jihua Group, ТОВ «Кірі Індастріз», LANXESS AG, С.А. Робама, Компанія «Сумітомо Кемікал Ко. Лтд.», Zhejiang Runtu Co. Ltd. [9].

Аналіз [13] показав, що відсутні офіційні статистичні дані щодо обсягів виробництва та споживання барвників, що використовуються у

шкіряній та текстильній промисловості.

Розглянемо структуру експортно-імпортних операцій барвників для шкіряної та текстильної промисловості протягом 2020-2025рр на ринку України [14]. Аналіз проведено згідно з Українською класифікацією товарів зовнішньоекономічної діяльності (УКТЗЕД) [15] за товарною позицією 3204 «Органічні, синтетичні фарбувальні речовини визначеного або не визначеного хімічного складу; препарати, зазначені у примітці 3 до цієї групи, виготовлені на основі органічних синтетичних фарбувальних речовин; органічні синтетичні продукти видів, які використовують як флуоресцентні відбілювальні препарати або як люмінофори, визначеного або не визначеного хімічного складу» (рис. 2).

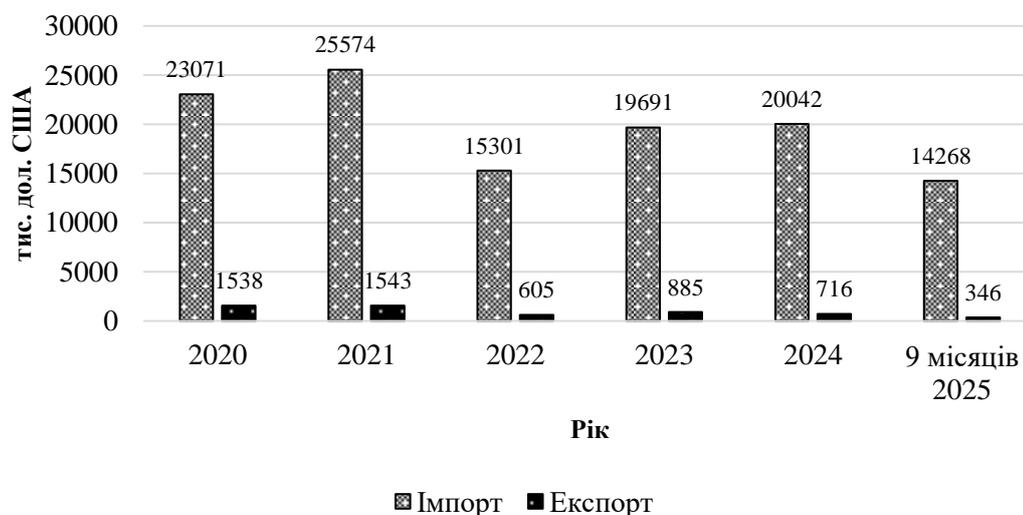


Рис. 2. Динаміка обсягів експортно-імпортних операцій з барвниками за товарною позицією 3204 згідно з УКТЗЕД, у 2020-2025рр., тис. дол. США

Протягом усього аналізованого періоду спостерігається суттєва перевага імпорту над експортом, що свідчить про значну залежність вітчизняного ринку від поставок барвників з-за кордону (рис. 2).

Імпорт демонструє загалом нестабільну, але високу динаміку. Найбільший обсяг імпорту зафіксовано у 2021 році і він склав 25574 тис. дол. США, перевищивши показник 2020 року (23071 тис. дол. США). У 2022 році обсяги імпорту значно скоротилися до 15301 тис. дол. США через повномасштабне вторгнення та пов'язані з ним економічні труднощі. У 2023 та 2024 роках відбулося часткове відновлення імпорту, досягнувши 19691 тис. дол. США та 20042 тис. дол. США відповідно. За 9 місяців 2025 року обсяг імпорту склав 14 268 тис. дол. США, що є помітно нижчим за показники повних попередніх років, але очікувано, оскільки це дані лише за частину року [14]. Експорт залишається на низькому рівні, що підкреслює слабкість експортного потенціалу у цій товарній групі. Максимальне значення експорту зафіксовано у 2023 році і склало 885 тис. дол. США. У решті періодів він коливався у діапазоні від 346 тис. дол. США (9 місяців 2025 р.) до 1543 тис. дол. США (2021 рік), у 2020 році він становив 1538 тис. дол. США. Зниження експорту у 2022 році до 605 тис. дол. США також може

бути наслідком військових дій та логістичних проблем [14].

Таким чином, рис. 2 чітко показує домінуючу роль імпорту на ринку барвників в Україні, а також значні коливання обсягів зовнішньоторговельних операцій, особливо імпорту, після 2021 року, що може бути пов'язано з глобальними та внутрішніми економічними чинниками, включаючи вплив військових дій.

Структуру імпорту барвників за країнами у 2025 році наведено на рис. 3.

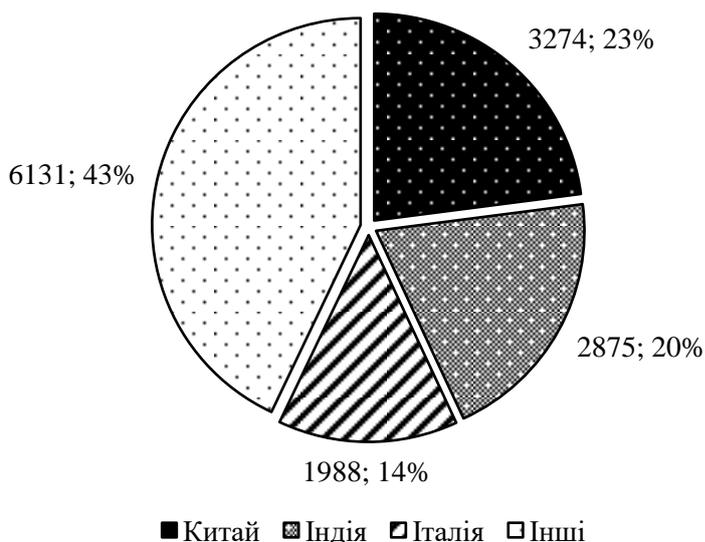


Рис. 3. Структура імпорту барвників (за товарною позицією 3204 згідно з УКТЗЕД) за країнами у 2025рр., тис. дол. США, %

Аналіз рис. 3 показує, що ринок імпорту барвників є консолідованим, де домінують кілька ключових країн.

Найбільшу частку в структурі імпорту займає категорія «Інші» країни, на яку припадає 43% загального обсягу, що складає 6131 тис. дол. США. Це свідчить про значну диверсифікацію постачальників поза межами трьох, що виділені окремо [14].

Китай є найбільшим прямим постачальником, забезпечуючи 23% імпорту на суму 3274 тис. дол. США. Індія посідає друге місце серед окремих країн-постачальників з часткою 20%, що відповідає обсягу 2875 тис. дол. США. Італія є третім за значущістю індивідуальним постачальником, її частка становить 14%, або 1988 тис. дол. США (рис. 3) [14].

Таким чином, сумарно Китай, Індія та Італія забезпечують 57% всього імпорту барвників, підтверджуючи їхню ключову роль на ринку. Решта постачань (43%) надходять з інших країн. Це вказує на те, що понад половина імпорту зосереджена на азійських (Китай та Індія) та європейських (Італія) виробниках [14].

Структуру експорту барвників за країнами у 2025 році наведено на рис. 4. Структура експорту демонструє високу концентрацію поставок, де понад половина експорту спрямовується до категорії «Інші» країни, а також суттєву залежність від трьох ключових напрямків.

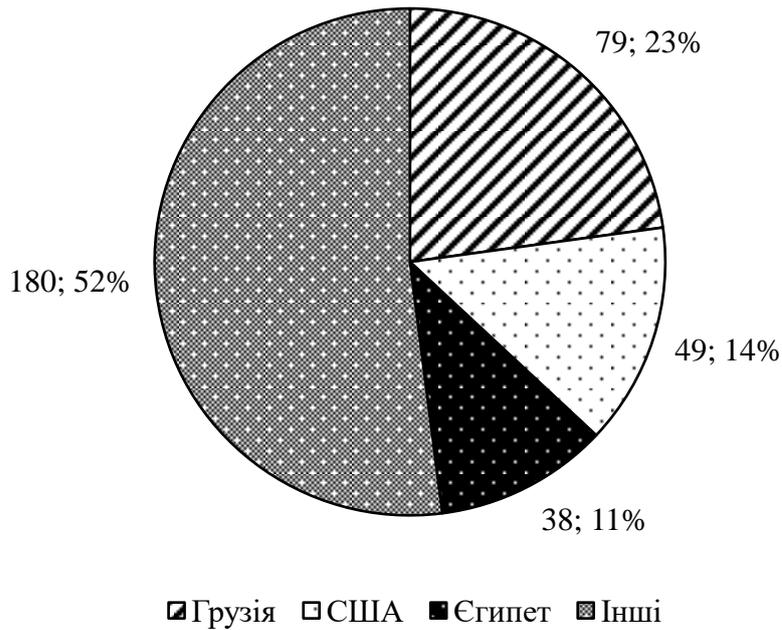


Рис. 4. Структура експорту барвників (за товарною позицією 3204 згідно з УКТЗЕД) за країнами у 2025рр., тис. дол. США, %

Найбільшу частку в структурі займає категорія «Інші» країни, на яку припадає 52% загального експорту, що становить 180 тис. дол. США. Це вказує на те, що українські барвники постачаються на різноманітні ринки, проте жоден із них не є домінуючим поодиноці [14].

Серед трьох виділених країн-партнерів, Грузія є найбільшим прямим імпортером, отримуючи 23% експорту на суму 79 тис. дол. США. США посідають друге місце з часткою 14%, що відповідає обсягу 49 тис. дол. США. Єгипет є третім за значущістю індивідуальним партнером, його частка складає 11%, або 38 тис. дол. США (рис. 4) [14]. Сумарно Грузія, США та Єгипет забезпечують 48% українського експорту барвників. Рис. 3 демонструє, що географія експорту є широкою, але фокусується як на сусідніх регіонах (Грузія, Єгипет), так і на віддалених ринках (США) [14].

Отже, ринок барвників для ЛП демонструє впевнене та стабільне зростання, де ключовими споживачами є текстильна (понад 60% попиту) та шкіряна галузі. Азійсько-Тихоокеанський регіон (особливо Китай та Індія) виступає беззаперечним глобальним лідером як у виробництві, так і у споживанні, що обумовлено високою концентрацією виробничих потужностей та зростанням середнього класу. Галузь переживає суттєву трансформацію, спричинену посиленням екологічного регулювання та зміною споживчих переваг на користь сталого розвитку. Це стимулює інвестиції у розробку та впровадження екологічно чистих, високопродуктивних та біо-основних барвників, причому сегмент натуральних барвників демонструє найвищі темпи зростання. Загалом, ринок є динамічним, керується потребою в інноваціях для підвищення ефективності фарбування та стійкості до зовнішніх впливів, а також необхідністю балансувати між економічною ефективністю та

екологічною відповідальністю.

В умовах стрімкого зростання світового ринку барвників для ЛП, особливо з огляду на необхідність переходу до екологічно чистих і високопродуктивних рішень, сам обсяг і різноманітність хімічних сполук, що використовуються, стають величезними.

Сьогодні виробники оперують великою кількістю барвників, кожен із яких має унікальні властивості щодо кольоростійкості, здатності до зв'язування з різними волокнами (бавовна, шерсть, поліестер, шкіра) та, що найважливіше, екологічного профілю. Саме ця складність і динаміка ринку, а також необхідність забезпечення контролю якості, безпеки та дотримання міжнародних екологічних стандартів (наприклад, REACH [11], ZDHC [16]), вимагають уніфікованої класифікації та систематизації барвників. Процеси фарбування, стандартизувати торгівлю та, найголовніше, гарантувати споживачеві безпеку кінцевого продукту.

Тому доцільно буде навести класифікаційні ознаки барвників, що застосовуються в ЛП: за сферою використання; за природою походження; за хімічною структурою; за розчинністю; залежно від природи волоко за іоногенною природою залежно від методу дублення.

Класифікація барвників за сферою використання є практичним підходом, який групує їх залежно від типу матеріалу, що підлягає фарбуванню, та конкретної галузі промисловості. Найбільш широке застосування барвники знаходять у ЛП (текстиль та шкіра), але вони також критично важливі в інших секторах (рис. 5).

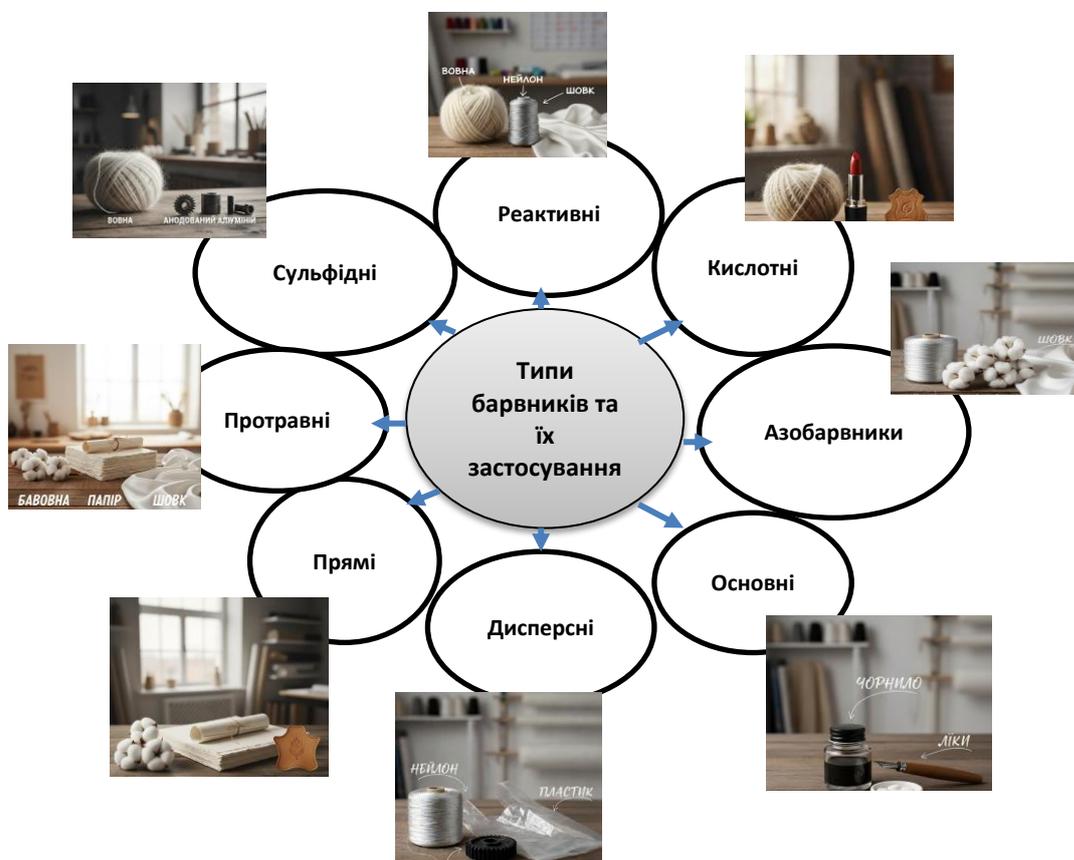


Рис. 5. Класифікація барвників за сферою використання [7]

Рис. 5 відображає комплексну схему класифікації органічних барвників та їх промислового застосування, візуалізовану у форматі радіальної діаграми, що розгалужується на основні класи. Зокрема, реактивні та азобарвники знаходять широке застосування для фарбування текстильних волокон (вовна, шовк, нейлон, бавовна).

Кислотні барвники традиційно використовуються для вовни, шкіри та косметики, тоді як дисперсні барвники є основними для фарбування синтетичних матеріалів (поліаміду, нейлону та пластику) через їхню спорідненість до гідрофобних волокон. Прямі та тіазинові барвники переважно застосовуються для целюлозних матеріалів (бавовна, папір) та шкіри. Крім того, схема ілюструє високоспеціалізовані застосування: основні барвники (наприклад, метиленовий синій) використовуються в медицині та для чорнила, а протравні барвники – для анодованого алюмінію. Рис. 5 підкреслює фундаментальний принцип, що хімічна структура барвника критично визначає його сумісність з типом матеріалу, що зумовлює його промислове використання. Наведемо класифікацію барвників для текстильної промисловості за природою походження (рис. 6).

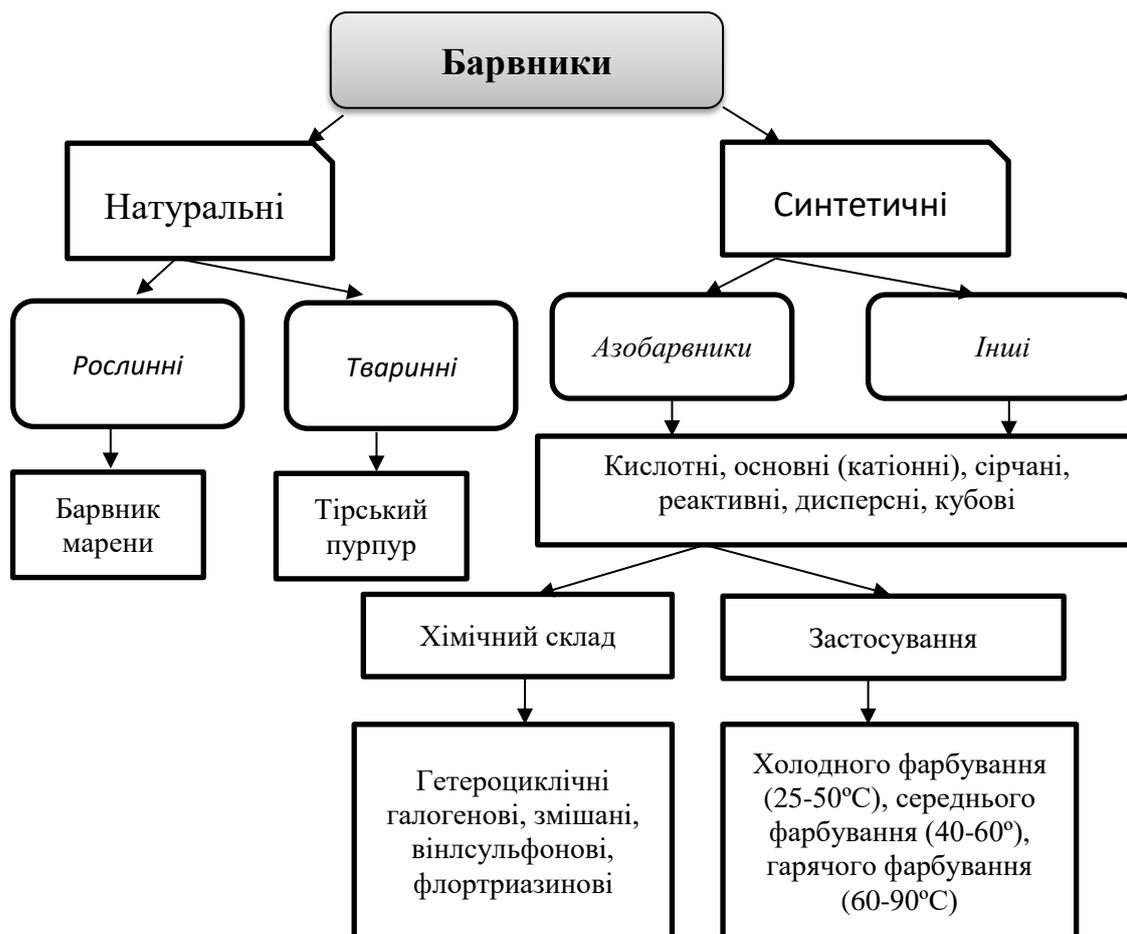


Рис. 6. Класифікація барвників для текстильної промисловості за природою походження

Аналізуючи рис. 6 встановлено, що базове розділення всіх барвників відбувається за їхньою природою походження на натуральні та синтетичні. Натуральні барвники мають обмежену класифікацію, поділяючись виключно за біологічним джерелом на рослинні (як, наприклад, барвник марени) та тваринні (як тірський пурпур). Натомість, синтетичні барвники демонструють значно більшу складність та різноманітність, починаючи з поділу на азобарвники та інші. Особлива увага приділяється азобарвникам, які далі деталізуються за функціональними групами (кислотні, основні, реактивні, кубові тощо), за хімічним складом (гетероциклічні, галогенові) та, що є критично важливим для виробництва, за застосуванням, тобто температурними режимами фарбування — холодним (25-50°C), середнім (40-60°C) та гарячим (60-90°C). Таким чином, рис. 6 ілюструє, що в сучасній текстильній промисловості домінують синтетичні барвники завдяки їхній великій структурній варіативності та можливості точного контролю технологічних процесів, що відображено у їхній багатогранній класифікації за хімією та умовами використання. Тому, постає необхідність деталізації класифікації синтетичних барвників для текстильної промисловості за іншими ознаками (рис. 7).

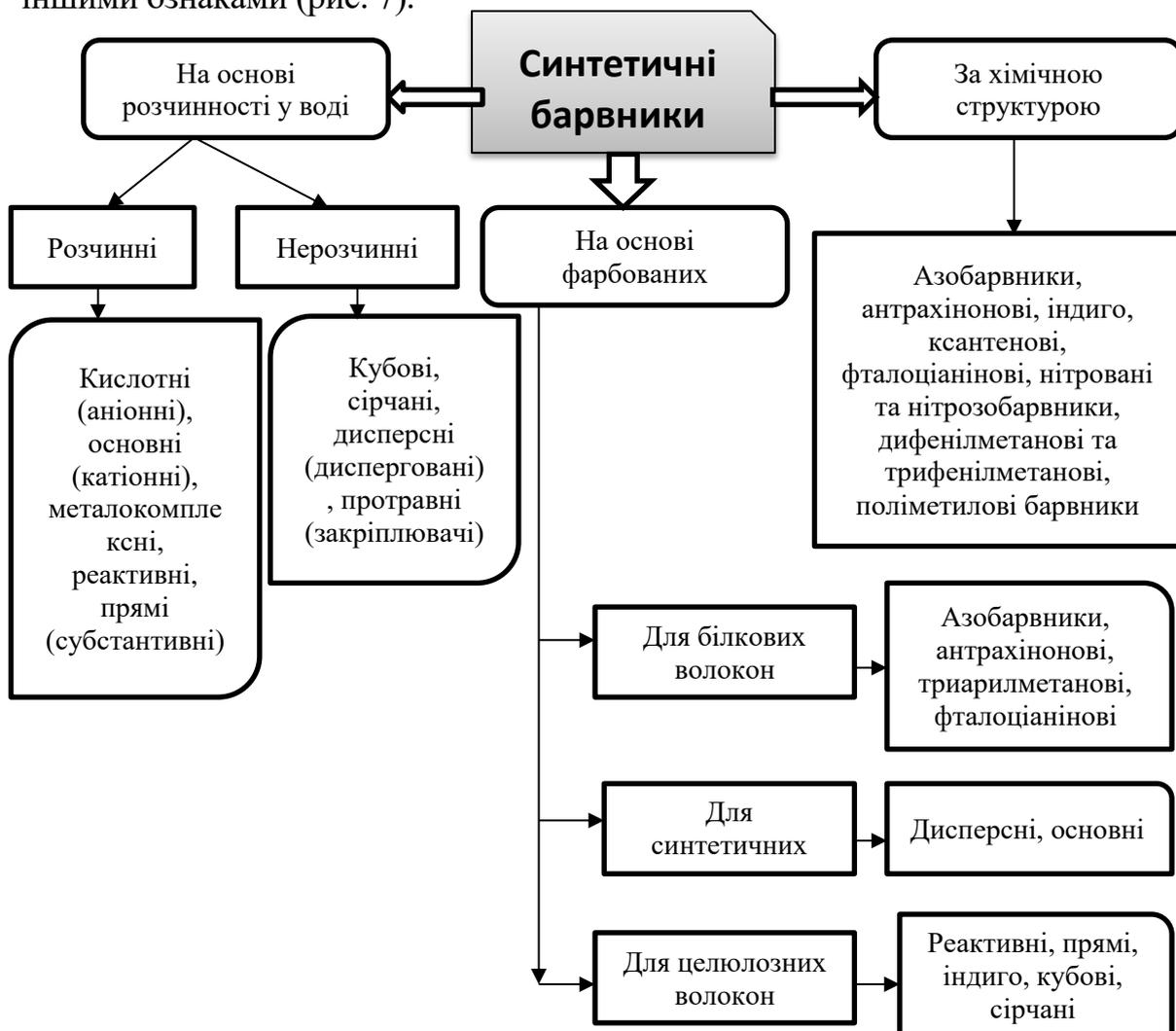


Рис. 7. Класифікація синтетичних барвників для текстильної промисловості

Рис. 7 охоплює повну класифікацію синтетичних барвників, розкриваючи їхню хімічну природу, методи застосування та особливості фарбування. Барвники поділяються на класи за розчинністю у воді (розчинні та нерозчинні), хімічною структурою (азо-, антрахінонові, нітро- та інші) та типом фарбованих волокон (для целюлозних, білкових та синтетичних).

Ключові класи барвників демонструють специфічні характеристики: кислотні (аніонні) використовуються для білкових волокон (вовна, шовк) у кислому середовищі. Основні (катіонні) відомі яскравими кольорами та винятковою стійкістю на акрилових волокнах, хоча історично це найстаріший синтетичний клас. Прямі барвники прості у застосуванні, оскільки наносяться безпосередньо, ефективні для целюлози, але їхню стійкість часто необхідно підвищувати подальшою обробкою. Азобарвники є найпоширенішими та важливі для отримання яскраво-червоних відтінків. Дисперсні барвники, будучи нерозчинними, ефективні для фарбування гідрофобних синтетичних волокон (поліестер, нейлон).

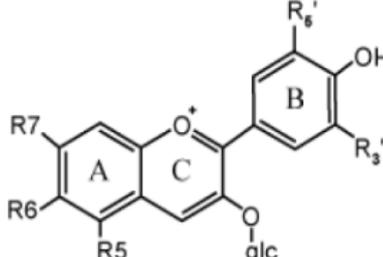
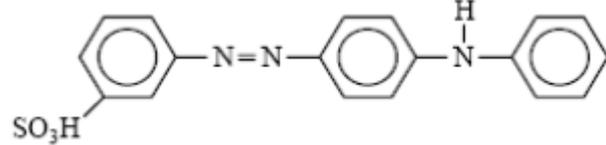
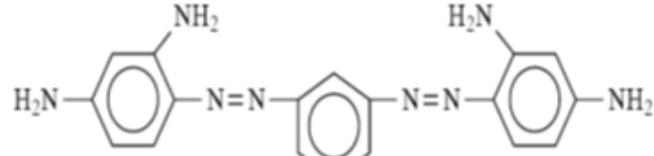
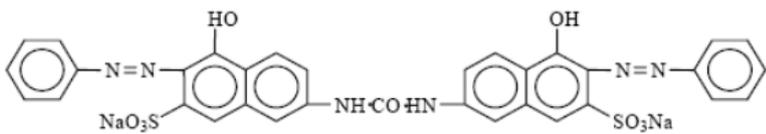
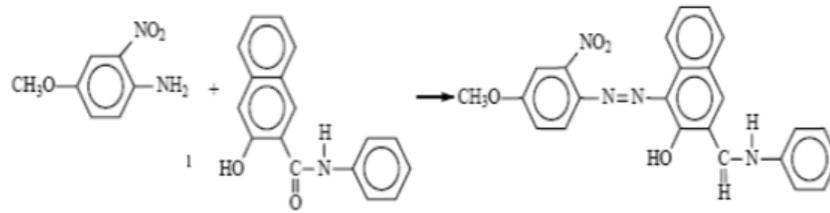
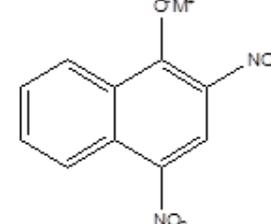
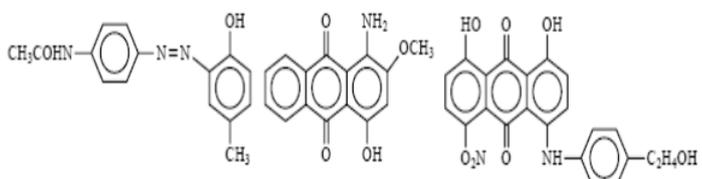
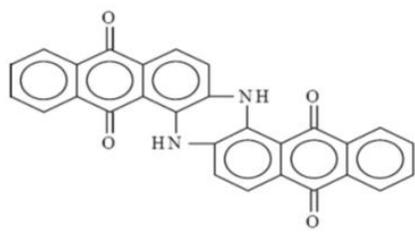
Найбільш стійкі до зовнішніх впливів барвники – це кубові та реактивні. Кубові барвники (наприклад, індиго) вимагають відновлення та надають високу стійкість до світла і прання. Реактивні барвники досягають надзвичайної стійкості, оскільки утворюють міцний ковалентний зв'язок безпосередньо з молекулою волокна. Натомість, протравні барвники використовують іони металів як зв'язуючий місток для формування нерозчинного комплексу на тканині, забезпечуючи високу стійкість, особливо для темних кольорів. На противагу, сірчані барвники є економічними та стійкими до прання, але можуть послаблювати структуру тканини.

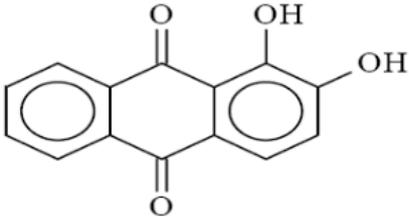
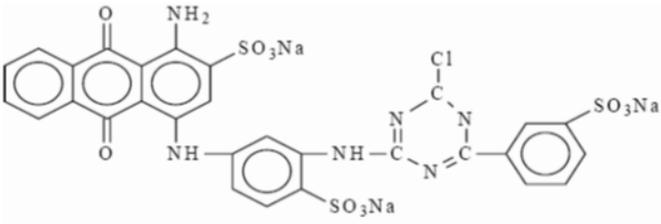
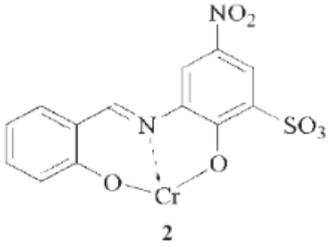
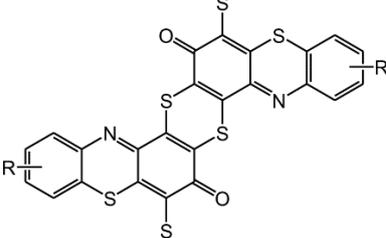
Таким чином, вибір конкретного класу барвника у ЛП є стратегічним рішенням, яке залежить від хімічної природи волокна, необхідного рівня стійкості кольору до світла, прання та тертя, а також від економічної доцільності та бажаного колірної відтінку.

Розглянемо детальніше класифікацію барвників, що використовуються в текстильній промисловості, за принципом хімічної дії [17].

Класифікація барвників за хімічною будовою є фундаментальною та охоплює низку різноманітних структурних класів. До основних із них належать азобарвники, які вирізняються наявністю азогрупи ($-N=N-$), а також антрахінонові барвники, похідні антрахінону. До важливих груп входять арилметанові барвники, що містять метанові структури, та класичні барвники індиго. Серед гетероциклічних сполук значну роль відіграють сірчані барвники та фталоціанінові барвники. Також виділяють групи нітро- та нітробарвників. Крім цих ключових структурних типів, класифікація включає й інші групи, такі як метинові та поліметинові барвники, стильбенові барвники, а також різноманітні гетероциклічні барвники, які часто мають складну будову (табл. 1) [17].

Таблиця 1. Класифікація барвників для текстильної промисловості за хімічною структурою

Назва	Хімічна формула
Натуральні барвники	
Кислотні барвники	
Основні або катіонні барвники	
Прямі барвники	
Азобарвники	
Нітробарвники	
Дисперсні барвники	
Кубові барвники	

Протравні барвники	
Реактивні барвники	
Барвники на основі розчинника	
Сірчані барвники	

Натуральні барвники – це речовини, які отримують виключно з природних джерел. Хоча історично вони були основним засобом фарбування, сьогодні їх витіснили синтетичні аналоги, оскільки останні надійніші, економічно вигідніші та легші у виробництві. Серед натуральних барвників, які все ще знаходять застосування, варто відзначити гематоксилін, кармін та орцеїн. Натуральні барвники часто мають негативний заряд. Позитивно заряджені природні барвники існують, але вони не є поширеними. Іншими словами, забарвленою частиною молекули зазвичай є аніон. Хоча молекулярний заряд часто вказується на певному атомі в структурних формулах, зарядженою є вся молекула [17].

Кислотні барвники становлять важливий клас водорозчинних аніонних барвників, які у своїй структурі містять одну або декілька сульфокислотних чи інших кислотних груп, наприклад, такі як Кислотний жовтий 36. Ці барвники спеціально призначені для фарбування білкових та деяких синтетичних волокон, включаючи шовк, вовну, нейлон і модифіковані акрилові волокна, причому їх нанесення відбувається у

нейтрально-кислотних фарбувальних ваннах. Важливою особливістю є те, що кислотні барвники не є суттєвими для целюлозних волокон, тобто вони не здатні надійно їх фарбувати [17].

Основні (катіонні) барвники є першою групою синтетичних барвників, отриманих з похідних кам'яновугільної смоли. Незважаючи на те, що у фарбуванні текстилю вони були значною мірою витіснені новішими розробками, вони зберігають свою актуальність у сфері друкарства, а також для обробки матеріалів, таких як шкіра, папір, дерево та солома. В останні роки ці барвники набули нового успіху завдяки їх застосуванню на певних синтетичних волокнах, особливо акрилових, яким вони надають яскраві кольори з високою стійкістю. Вони використовувалися для фарбування вовни, шовку, льону та конопель без необхідності використання протрави, хоча при роботі з бавовною та віскозою протрава, наприклад, дубильна кислота, була потрібна. Катіонні барвники також можуть застосовуватися для фарбування деяких основних модифікацій нейлону та поліестеру. Прикладом цієї групи є Базовий коричневий 1, який ефективно діє в умовах фарбування при низькому рН (від 2 до 5) [17].

Прямі барвники – це клас барвників, які відрізняються здатністю безпосередньо наноситися на тканини з водного розчину, що зробило непотрібним використання протрави при фарбуванні бавовни. Вони є найбільш ефективними для волокон, які можуть утворювати з ними водневі зв'язки, зокрема, використовуються для бавовни, льону, віскози, а також вовни, шовку та нейлону. Хімічно ці барвники характеризуються наявністю азозв'язку ($-N=N-$) та високою молекулярною масою, а їхня водорозчинність забезпечується присутністю сульфонових кислотних груп. Хоча прямі барвники дають менш яскраві кольори порівняно з основними барвниками, вони мають кращу стійкість до світла та прання, яку можна значно підвищити за допомогою додаткової післяобробки (наприклад, діазотуванням та проявленням). Типовим прикладом цієї групи є Прямий помаранчевий 26 [17].

Азобарвники є найпоширенішим класом барвників, ключовою особливістю яких є наявність щонайменше однієї азогрупи ($-N=N-$), що з'єднує одне або два ароматичні кільця. Ці барвники надзвичайно важливі для текстильної промисловості, оскільки їх переважно використовують для отримання яскраво-червоних відтінків при фарбуванні та друці, заповнюючи прогалину, де більшості інших стійких класів барвників бракує якісних червоних кольорів. У промисловості їх часто називають нафтолами, а їхній процес застосування є унікальним: колір формується безпосередньо на тканині. Важливою умовою є те, що без належного та ретельного нанесення і промивання ці барвники можуть мати погану стійкість до тертя (зношування). Прикладом такої реакції є отримання блакитно-червоного азойного барвника з двох окремих компонентів [17].

Нітробарвники являють собою клас барвників, які є полінітропохідними фенолів і містять у своїй структурі принаймні одну нітросгрупу ($-NO_2$) у позиції орто або пара відносно гідроксильної групи ($-$

ОН). За своєю будовою вони складаються з двох або більше ароматичних кілець (наприклад, похідні бензолу чи нафталіну). Основне їхнє застосування полягає у фарбуванні вовни [17].

Дисперсні барвники – це клас барвників, створений для фарбування вторинних волокон ацетату целюлози. Вони майже нерозчинні у воді, тому для підготовки до фарбування їх подрібнюють до стану дуже дрібного порошку у присутності диспергувальних агентів. У фарбувальній ванні ці частинки утворюють суспензію, яка забезпечує розбавлений розчин, з якого барвники потім поглинаються волокнами. Сьогодні дисперсні барвники широко використовуються для фарбування поліефірних (поліестер), нейлонових, ацетатних та триацетатних волокон. Типовими прикладами є Дисперсний жовтий 3, Дисперсний червоний 4 та Дисперсний синій 27 [17].

Кубові барвники – це клас нерозчинних, складних поліциклічних молекул, хімічна основа яких базується на хіноновій (кетоформі) структурі. Свою назву «кубові» вони отримали від давнього методу фарбування індиго у спеціальних чанах (кубах), де барвник необхідно було спочатку відновити до розчинної (лейко-) форми. Ці барвники, які зазвичай отримують з таких сполук, як індиго, антрахінон та карбазол, забезпечують високу стійкість до прання та світла. Вони ефективно застосовуються для фарбування широкого спектру матеріалів, включаючи бавовну, льон, віскозу, вовну, шовк та нейлон. Крім традиційного фарбування, кубові барвники також використовуються у процесах безперервного фарбування, відомих як процес нанесення пігменту. Типовим прикладом кубового барвника є Кубовий синій 4 (індантрен) [17].

Протравні барвники належать до групи, яка не здатна безпосередньо забарвлювати тканину і вимагає використання зв'язуючого агента, відомого як протрава. Протрава виконує роль посередника, хімічно з'єднуючи барвник із волокном. Ці барвники поєднуються із солями металів (тобто протравлюються), утворюючи нерозчинні кольорові комплекси, які називаються лаками, безпосередньо всередині волокна. Цей механізм, що застосовується переважно для фарбування бавовни, вовни та інших білкових волокон, забезпечує осадження металевого комплексу у волокні. Результатом є стійке забарвлення, що відрізняється високою стійкістю як до світла, так і до прання [17].

Протравні барвники є економічним вибором і зазвичай застосовуються для отримання темних відтінків, таких як темно-зелений, темно-синій та чорний. Вони характеризуються хорошими властивостями вирівнювання та стійкості кольору. Взаємодія між волокном і барвником встановлюється через дуже міцні іонні зв'язки: іон металу (наприклад, хром) діє як місток між аніонними групами барвника та катіонами амонію на волокні. Утворення цього нерозчинного кольорового комплексу (лаку) забезпечує дуже міцний зв'язок і забезпечує високу стійкість до зовнішніх впливів [17].

Реактивні барвники – це сучасний клас барвників, основною особливістю яких є здатність хімічно реагувати з волокном, утворюючи

міцний ковалентний зв'язок. Це досягається завдяки тому, що барвник містить реактивну групу, яка безпосередньо з'єднується з гідроксильною ($-OH$) або аміногрупою ($-NH_2$) волокна. Внаслідок цієї хімічної фіксації досягається надзвичайно висока стійкість до прання, забезпечуючи кольору тривалий термін служби. Цей тип фарбування ефективно використовується для широкого спектру матеріалів, включаючи бавовну, вовну та шовк [17].

Барвники на основі розчинника є класом барвників, які нерозчинні у воді, але легко розчиняються в органічних розчинниках, таких як спирти, хлоровані вуглеводні або рідкий аміак. Ці кольори наносяться шляхом розчинення їх безпосередньо у цільовому матеріалі, який завжди є ліпідним або неполярним розчинником. Вони використовуються переважно для фарбування синтетичних матеріалів, пластмас, бензину та масел [17].

Сірчані барвники відомі своєю здатністю надавати тканинам дуже глибокі відтінки та демонструвати чудову стійкість до прання. Однак їхнім недоліком є погана стійкість до сонячного світла. Вони ефективно фарбують бавовну, льон та віскозу, хоча й без досягнення яскравих кольорів. Технологічно сірчані барвники наносяться на бавовняні тканини з лужної відновлювальної ванни, де як відновник використовується сульфід натрію. Ці барвники є недорогими і мають гарну стійкість не лише до прання, але й до світла та кислот. Проте, серйозною проблемою, особливо для чорних кольорів, є те, що сірчані барвники можуть спричинити послаблення структури тканини, роблячи її вразливою до розривів [17].

Хоча натуральні барвники історично важливі, сучасна текстильна промисловість майже повністю покладається на синтетичні аналоги завдяки їхній економічності, надійності та можливості створювати ширший спектр кольорів. Кожен клас синтетичних барвників спеціалізується на конкретному типі волокна та механізмі фіксації: від іонних зв'язків та адсорбції до хімічно міцних ковалентних зв'язків у реактивних барвниках та утворення нерозчинних лаків у протравних барвниках, що в сукупності дозволяє точно контролювати якість, яскравість та стійкість фарбування.

Продовжуючи аналіз класифікації, важливо деталізувати, як конкретні типи барвників використовуються в текстильній промисловості залежно від хімічної природи волокна (тканини). Вибір барвника залежить від його здатності утворювати міцні хімічні зв'язки з волокном, забезпечуючи необхідну стійкість кольору (до світла, прання, тертя) (табл. 2).

Аналіз табл. 2 демонструє ефективність барвників залежно від хімічної природи текстильного волокна. Целюлозні волокна, такі як бавовна та льон, мають найбільший вибір методів фарбування, оскільки вони сумісні з прямими, реактивними, кубовими, сірчаними та азобарвниками, причому реактивні та кубові забезпечують найвищу стійкість кольору. Білкові волокна, а саме шовк та шерсть, найкраще фарбуються кислотними та основними барвниками завдяки їхній іонній взаємодії, а також реактивними та кубовими для підвищеної стійкості.

Синтетичні волокна вимагають вузькоспеціалізованих класів: поліестер домінує у використанні дисперсних барвників через свою гідрофобну природу, а акрилові волокна ефективно фарбуються основними (катіонними) барвниками, які утворюють міцні зв'язки з негативно зарядженими ділянками волокна. Таким чином, сучасна текстильна промисловість керується принципом хімічної сумісності, де кожен клас барвників оптимізований для забезпечення максимальної стійкості та яскравості кольору на конкретному типі волокна.

Таблиця 2. Класифікація барвників для текстильної промисловості залежно від природи волокон

Барвник	Волокна						
	Бавовна	Льон	Шовк	Вовна	Нейлон	Поліестер	Акрилові волокна
Натуральний	●	●	●	●			
Кислотний (аніонний)			●	●	●		
Основний (катіонний)	○	○	●	●	○	○	●
Прямий	●	●	●	●	●		
Азобарвник	●	●					
Нітробарвник				●			
Дисперсний					●	●	●
Кубовий	●	●	●	●	●		
Протравний	●		●	●			
Реактивний	●	●	○	○	○		
На основі розчинника						●	●
Сірчаний	●	●					

● – ефективно основне застосування;

○ – потребує додаткової обробки (модифікування, протрави)

Виходячи з детальної класифікації та застосування барвників у текстильній промисловості, де вибір залежить від хімічної природи волокна (целюлозний, білковий, синтетичний), логічним є перехід до шкіряної промисловості. Хоча принципи фарбування залишаються незмінними (забезпечення стійкої фіксації кольору), хімічна основа суттєво змінюється. Шкіра є природним матеріалом, який складається переважно з колагенових білків, що за своєю хімічною структурою найбільше нагадує вовну та шовк. Отже, можна припустити, що більшість барвників, які домінують у фарбуванні білкових волокон у текстилі, будуть ключовими і для шкіри.

У шкіряній промисловості акцент зміщується на класи барвників, які ефективно взаємодіють з білковою (колагеновою) основою: зокрема, кислотні, основні, прямі та протравні барвники стають основними для забезпечення глибокого проникнення, яскравості та високої стійкості кольору на шкірі. Для надання кольору матеріалам використовують природні або синтетичні барвники. Однак, у шкіряній промисловості для

фарбування використовують виключно синтетичні барвники. Ці синтетичні сполуки – це речовини, які здатні поглинати та трансформувати енергію світла у видимому спектрі, передаючи цю властивість (колір) іншим матеріалам [19]. Наведемо класифікацію барвників для шкіряної промисловості за природою походження (рис. 8).

Рис. 6 представляє чітку ієрархічну класифікацію барвників, що використовуються у шкіряній промисловості, розподіляючи їх за природою походження на дві основні групи: натуральні та синтетичні. Натуральні барвники, що є традиційними для галузі, поділяються на рослинні (включаючи барвник марени, таніни з кори дуба, каштана, кореня ревеню) та тваринні (представлені тирським пурпуром і кошениллю). Водночас, синтетичні барвники складають більш різноманітний і хімічно складний сегмент, класифікуючись за своєю структурою на чотири великі класи: азобарвники, які є найбільш чисельними та включають кислотні, прямі, основні та металокомплексні типи; антрахінонові барвники, представлені кислотними та дисперсними різновидами; а також триарилметанові та фталоціанінові барвники.

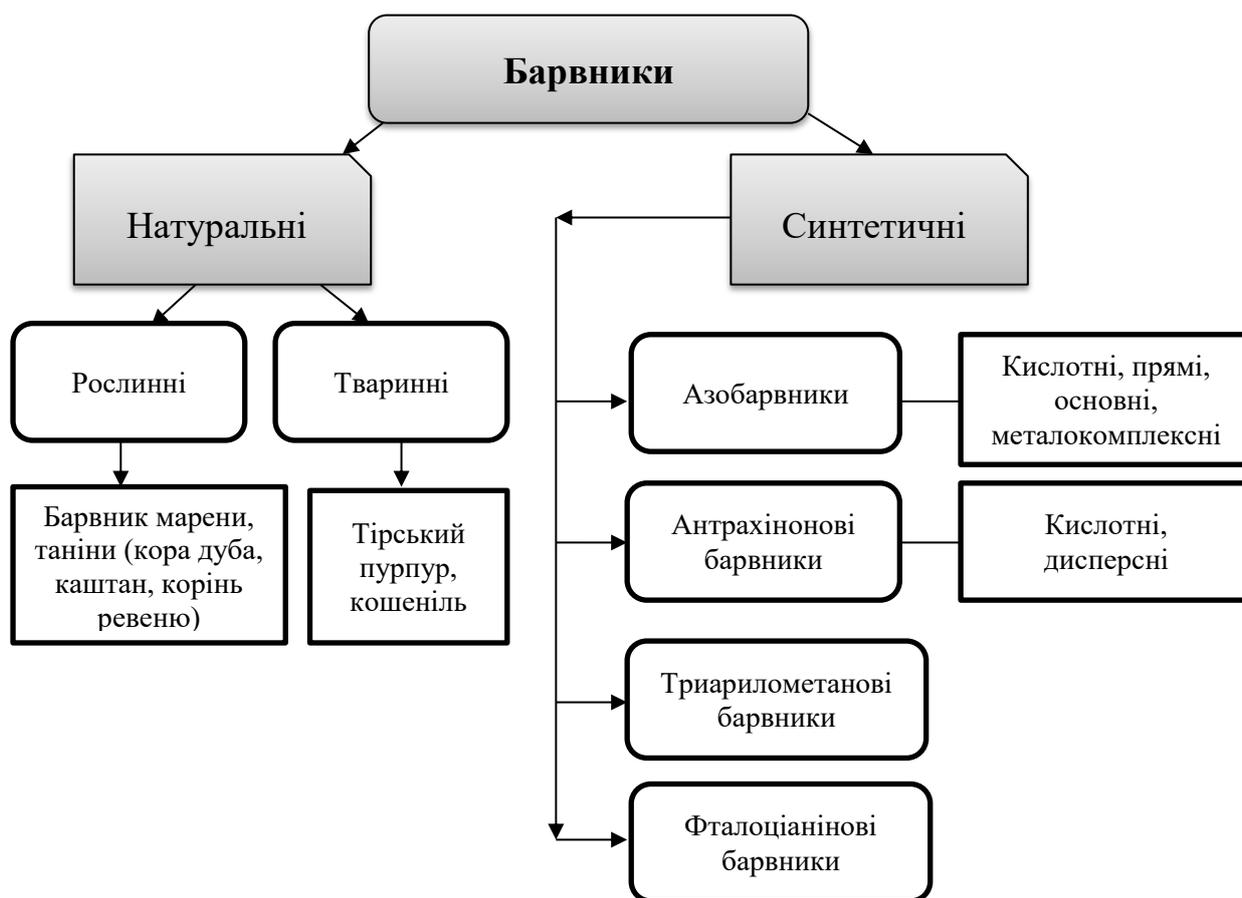


Рис. 8. Класифікація барвників для шкіряної промисловості за природою походження

У виробництві натуральної шкіри переважно використовують аніонні барвники, оскільки ці водорозчинні хімічні сполуки при дисоціації у водному розчині утворюють кольоровий аніон (негативно заряджену частинку), який є активним барвником; цей механізм є ідеальним для

фарбування дубленої шкіри, оскільки негативно заряджені кольорові іони ефективно взаємодіють з позитивно зарядженими ділянками шкіряних волокон, забезпечуючи рівномірне, глибоке та стійке проникнення і фіксацію кольору [19].

Наведемо класифікацію барвників для шкіряної промисловості за іоногенною природою (табл. 3). Представлена табл. 3 детально класифікує барвники для шкіряної промисловості за їхньою іонною природою, визначаючи ключові відмінності у механізмі їхньої взаємодії зі шкірою та основних сферах застосування. Аніонні (кислі) барвники є найбільш поширеними: вони утворюють негативно заряджений кольоровий аніон (A^-), який взаємодіє з позитивно зарядженими аміногрупами шкіри (RNH^+), що виникають після хромового дублення. Ця взаємодія забезпечує глибоке, рівномірне та стійке фарбування.

Таблиця 3. Класифікація барвників для шкіряної промисловості за іоногенною природою

Тип барвника	Іоногенна природа	Принцип взаємодії зі шкірою	Основне застосування
Аніонні (кислі)	Утворюють негативно заряджений (A^-) кольоровий аніон.	Взаємодіють з позитивно зарядженими (RNH_3^+) групами шкіри (після хромового дублення).	Найпоширеніші. Забезпечують глибоке, рівномірне та стійке фарбування.
Основні (катіонні)	Утворюють позитивно заряджений (K^+) кольоровий катіон.	Взаємодіють з негативно зарядженими ($RCOO^-$) групами шкіри (зазвичай виникають після рослинного дублення або при спеціальній підготовці).	Використовуються рідше, часто для посилення яскравості чи для специфічних ефектів.
Прямі (субстантивні)	Аніонні, але здатні безпосередньо фіксуватися на волокнах завдяки водневим зв'язкам і силам Ван дер Ваальса.	Хороша спорідненість до волокон, не вимагають протрав.	Фарбування в барабанах, як додаткові барвники.

На противагу їм, основні (катіонні) барвники утворюють позитивно заряджений кольоровий катіон (K^+), що взаємодіє з негативно зарядженими карбоксильними групами шкіри ($RCOO^-$), які зазвичай переважають після рослинного дублення або спеціальної підготовки. Ці барвники використовуються рідше, переважно для посилення яскравості чи досягнення заданих візуальних ефектів. Прямі (субстантивні) барвники є аніонними за іонною природою, але мають унікальну здатність безпосередньо фіксуватися на волокнах шкіри завдяки водневим зв'язкам та силам Ван дер Ваальса, не вимагаючи застосування протрав. Вони використовуються як додаткові

барвники, зокрема для фарбування у барабанах, завдяки своїй високій спорідненості до волокон. Таким чином, вибір типу барвника залежить від його іонного заряду та заряду дубленої шкіри, що дозволяє технологічно точно керувати процесом фарбування для досягнення необхідної стійкості, глибини та естетичних характеристик [20]. Окрім того, доцільним буде навести класифікацію барвників для шкіряної промисловості за розчинністю (табл. 4).

Таблиця 4. Класифікація барвників для шкіряної промисловості за розчинністю

Категорія	Характеристика	Механізм фарбування	Приклади (за хімічної природою)
Водорозчинні барвники	Повністю розчиняються у воді, утворюючи істинні розчини.	Фарбування в барабанах, зануренням. Колір ґрунтується на хімічній взаємодії (іонообмінні зв'язки) з волокнами шкіри.	Аніонні (кислі), прямі, основні (катіонні), частина металокомплексних барвників.
Спирторозчинні барвники	Розчиняються в органічних розчинниках (спиртах, ацетоні).	Використовуються для ручного фарбування, тонування, реставрації або для створення специфічних ефектів, що вимагають швидкого висихання.	Деякі нігрозини, окремі жиророзчинні барвники.
Жиророзчинні барвники	Розчиняються у жирах та оліях.	Застосовуються в процесі жирування.	Невеликий клас спеціалізованих барвників.

У табл. 4 наведено класифікацію барвників для шкіряної промисловості, що ґрунтується на їх розчинності. Найбільш поширеними є водорозчинні барвники, які повністю розчиняються у воді, утворюючи розчини, і застосовуються для масового фарбування в барабанах через хімічну взаємодію (іонообмінні зв'язки) з волокнами шкіри. До них належать більшість аніонних (кислотних), прямих, основних (катіонних) і частина металокомплексних барвників. Спирторозчинні барвники розчиняються в органічних розчинниках (спиртах, ацетоні) і використовуються для спеціальних цілей, таких як ручне фарбування, тонування, реставрація або створення ефектів, що вимагають швидкого висихання, зокрема деякі нігрозини та жиророзчинні барвники. Жиророзчинні барвники, розчиняються у жирах та оліях застосовуються у процесі жирування.

Отже, розчинність є ключовим параметром, який визначає не лише хімічну природу барвника, а й технологічний процес його застосування для досягнення бажаної глибини, рівномірності та специфічних ефектів забарвлення шкіри.

Класифікація барвників для шкіряної промисловості є важливим кроком, оскільки вона визначає хімічну природу, розчинність та спектр

кольору барвника. Проте, сама лише хімічна структура барвника не гарантує успішного та ефективного фарбування шкіри. Ефективність застосування барвників залежить від методу дублення шкіри. Кожен метод дублення (хромове, рослинне або синтетичне) залишає у волокнах колагену шкіри певний електричний заряд та набір реактивних груп. Шкіра хромового дублення має позитивний заряд, а рослинного дублення – негативний і більш щільну структуру. Ці характеристики дубленої шкіри безпосередньо впливають на спорідненість шкіри до барвника, а також на швидкість фарбування (табл. 5).

Таблиця 5. Класифікація барвників для шкіряної промисловості залежно від методу дублення

Барвник (за іонною природою / класом)	Шкіра хромового методу дублення	Шкіра рослинного методу дублення	Комбінована шкіра	Анілінова / Наппа шкіра	Замша / Нубук
Кислотний (аніонний)	●	○	●	●	●
Прямий	●	●	●	●	●
Металокомплексний	●	●	●	●	●
Основний (катионний)	○	●	○	○	●
Рідкий	○	○	○	●	●
Жиророзчинний	○	○	○	○	○
Антрахіноновий	●	○	●	●	●

● – ефективне основне застосування;

○ – потребує додаткової обробки (нейтралізації, протрави, модифікування поверхні)

Для хромової шкіри, що має позитивний заряд, кислотні (аніонні) барвники є основним та найбільш ефективним вибором, оскільки забезпечують глибоке та стійке фарбування. Шкіра рослинного методу дублення, яка зберігає або набуває негативного заряду, виявляє високу спорідненість до основних (катионних) барвників. Барвники, що є універсальними, такі як прямі (субстантивні) та металокомплексні, мають широке застосування на всіх типах шкіри, включаючи комбіновану, завдяки їхній здатності фіксуватися на шкірі не лише за рахунок іонного обміну. Використання основних барвників на комбінованій шкірі та шкірі хромового методу дублення, а також аніонних барвників на шкірі рослинного методу дублення, є можливим, але вимагає додаткової хімічної обробки (нейтралізації або модифікування). Спеціалізовані класи, такі як рідкі барвники на основі розчинника, використовуються переважно для тонування, реставрації або поверхневого фарбування анілінової/наппа шкіри та замші/нубуку, тоді як жиророзчинні барвники є нішевими та застосовуються виключно для внутрішнього забарвлення під час технологічного процесу жирування. Таким чином, успішне фарбування шкіри вимагає точного підбору класу барвника відповідно до заряду шкіри, отриманого після дублення, що дозволяє забезпечити необхідну глибину проникнення та рівномірність фарбування.

Фталоціанінові, азо- та антрахінонові барвники – це невелика частина

величезного хімічного арсеналу, що використовується для фарбування текстилю та шкіри. Класифікація цих барвників за їхньою хімічною структурою є основою для розуміння їхніх властивостей, технологічних особливостей застосування (якщо для шкіри критичним є метод дублення, то для текстилю – тип волокна), а також кінцевої стійкості кольору.

Однак, саме широке та інтенсивне використання цих синтетичних барвників, необхідних для задоволення споживчого попиту на яскраве та стійке фарбування, створює одну з найбільш гострих екологічних проблем сучасної ЛП: проблему утилізації та впливу на навколишнє середовище.

Після фарбування величезні об'єми стічних вод, що скидаються у водні системи, містять значні концентрації не лише самих барвників (до 10–15% яких не закріплюється на матеріалі), але й різноманітних допоміжних хімікатів. Багато з цих речовин є нетоксичними для людини, але їхня висока кольоровість блокує сонячне світло, порушуючи процес фотосинтезу водних рослин. Набагато серйознішу загрозу становлять певні класи барвників, особливо деякі азобарвники, які в процесі утилізації можуть розпадатися на ароматичні аміни — речовини, відомі своєю канцерогенністю. Таким чином, те, що забезпечує естетику та довговічність кінцевого товару (одяг чи шкіряні вироби), перетворюється на серйозне хімічне забруднення, що вимагає розробки та впровадження складних і дорогих методів очищення стічних вод.

Негативний вплив барвників для текстильної та шкіряної промисловості на навколишнє середовище наведено на рис. 9. Рис. 9 комплексно ілюструє, що текстильне та шкіряне виробництво є джерелами багатовекторного забруднення, яке вражає всі компоненти екосистеми. Основною проблемою є скидання стічних вод, які містять барвники, пластик та хімічні волокна, що призводить до критичного зниження кількості розчиненого кисню у водоймах, зміни їхнього фізико-хімічного складу (ХСК – хімічне споживання кисню, БСК – біологічне споживання кисню, рН) та порушення проникнення світла, що загрожує фотосинтезу. Це, в свою чергу, викликає ланцюгову реакцію: рослини потерпають від зниження росту, пошкодження кореневої системи та некрозу, а водні мікроорганізми зменшують синтез білка та хлорофілу, порушуючи свої метаболічні процеси. Найбільш вразливими є тварини водойм, у яких фіксується зростання смертності, гістопатологічні зміни та зниження вмісту життєво важливих речовин у тканинах. Окрім водного забруднення, промисловість здійснює значні викиди в повітря (оксиди азоту/сірки, вуглеводні, формальдегід), що разом із забрудненням води порушує трофічний рівень та екологічний баланс усієї екосистеми. Крім того, прямий та опосередкований контакт із цими токсинами становить серйозну загрозу для людей та тварин, викликаючи алергічні реакції, дерматити, а також підвищуючи ризики мутагенного та канцерогенного впливу через розпад барвників до токсичних амінів.

Текстильна та шкіряна промисловість є одними із найзначніших джерел забруднення світових водних ресурсів, відповідаючи приблизно за

п'яту частину (близько 20%) загального глобального забруднення води, що безпосередньо спричинене процесами фарбування та оздоблення тканин. Це екологічне навантаження виникає через скидання неочищених або недостатньо очищених стічних вод, які містять високотоксичні хімічні речовини, синтетичні барвники та важкі метали.



Рис. 9. Екологічний фактор впливу барвників текстильної та шкіряної промисловості на довкілля

Наслідки такого скидання є небезпечними, оскільки забруднені водні шляхи, річки та ґрунтові води становлять пряму загрозу для здоров'я як працівників текстильних підприємств, які контактують із цими хімікатами, так і місцевих громад, які проживають поблизу. Люди, що використовують уражені водойми для пиття, приготування їжі, риболовлі чи купання, піддаються ризику розвитку різноманітних проблем зі здоров'ям, включаючи шкірні захворювання, порушення функцій внутрішніх органів і, у довгостроковій перспективі, підвищений ризик онкологічних

захворювань, що робить це забруднення не лише екологічною, але й гострою соціальною та медичною проблемою [22].

Щороку ЛП виробляє близько 7×10^7 тон синтетичних барвників, проте майже 10% цього обсягу потрапляє у навколишнє середовище зі стічними водами після фарбування та обробки [7]. Оскільки очікується зростання виробництва текстильного волокна, можна припустити, що виробництво барвників зростатиме відповідно. Ці барвники, які використовуються для фарбування текстильних та шкіряних матеріалів, часто є неефективними, оскільки до 50% використаних речовин не фіксуються на волокні, а залишаються в рідкій фазі як забруднювачі [23].

Європейський Союз (ЄС) впровадив суворі регуляторні заходи, зокрема через регламент REACH [11], з метою обмеження або повної заборони використання багатьох небезпечних хімікатів, які роками застосовувалися в текстильній та шкіряній промисловості. Ці обмеження спрямовані на захист здоров'я споживачів, працівників та навколишнього середовища. Також під заборону опинилися деякі азобарвники та інші барвники, здатні розщеплюватися з вивільненням канцерогенних ароматичних амінів. Окрім цього, суворо обмежено використання високотоксичного та канцерогенного хрому VI (шестивалентного хрому) у процесі дублення шкіри для виробництва взуття та сумок, заохочуючи перехід на менш шкідливі альтернативи. Ці регуляції мають на меті стимулювати текстильну та шкіряну галузь до впровадження більш безпечних та екологічно стійких хімічних альтернатив, встановлюючи високі стандарти для всіх, хто постачає продукцію на європейський ринок [22].

Отже, текстильна та шкіряна промисловість створюють значне екологічне навантаження, яке вимагає впровадження ефективних заходів із контролю та очищення промислових стоків і викидів.

Таким чином, шляхи зменшення шкідливого впливу синтетичних барвників у шкіряній та текстильній промисловості наведено на рис. 10.

Рис. 10 ілюструє, що основний шлях до зменшення хімічного забруднення в текстильній та шкіряній промисловості полягає у повній заміні небезпечних барвників і хімікатів на безпечніші альтернативи. Це вимагає переходу на екологічно чисті барвники, які мають низьку токсичність та не містять важких металів, формальдегіду, а також заборонених азобарвників, що розпадаються на канцерогенні аміни. Також заохочується використання природних барвників, отриманих із рослин, мінералів або комах, проте їхнє застосування має бути можливим у промислових масштабах і забезпечувати необхідну стійкість кольору. Додатковою технологічною зміною є впровадження цифрового друку (зокрема, струменевого), який є значно ефективнішим з екологічної точки зору, оскільки вимагає суттєво менше води, енергії та барвників порівняно з традиційними методами трафаретного друку, що, у свою чергу, різко скорочує обсяги забруднених стічних вод [24].



Рис. 10. Шляхи зменшення шкідливого впливу синтетичних барвників у шкіряній та текстильній промисловості

Сучасне виробництво вимагає удосконалення технологічних процесів для мінімізації негативного впливу. Одним із найбільш радикальних кроків є застосування технологій фарбування з низьким вмістом води, зокрема інноваційного фарбування з використанням двоокису вуглецю (CO_2) у надкритичному стані (наприклад, технологія DyeCo₂). Цей метод повністю виключає використання води та значно зменшує потребу в допоміжних хімікатах. Також ефективним є метод фарбування до прядіння (Dope Dyeing), що передбачає внесення пігменту безпосередньо у полімерний розчин перед формуванням волокна, що не тільки покращує стійкість кольору, але й усуває необхідність у традиційному мокрому фарбуванні, тим самим різко скорочуючи забруднення води. Необхідно також запроваджувати оптимізацію рецептури через використання автоматизованих систем для надточної дозації барвників та хімікатів, що дозволяє мінімізувати їхні залишки, які інакше потрапили б у стічні води [24].

Екологічна стійкість текстильної та шкіряної промисловості неможлива без ефективного очищення та повторного використання води. Це вимагає встановлення передових систем очищення стічних вод, які повинні включати багатоступеневі методи: від фізико-хімічних процесів (таких як коагуляція та флокуляція) і біологічної обробки до третинних методів очищення (зокрема, мембранної фільтрації, використання активованого вугілля та озонування). Комплексне застосування цих

технологій забезпечує повне видалення кольору, солей та токсичних речовин з води. Кінцева мета полягає у запровадженні замкнених циклів водопостачання (або Water Recycling), що дозволяє повторно використовувати очищену стічну воду з процесу фарбування на інших етапах виробництва, значно знижуючи загальне споживання свіжої води та скидання забруднень [25].

Невід'ємною складовою зменшення шкідливого впливу є посилення регулювання та сертифікації у галузі. Це передбачає обов'язкове та неухильне дотримання міжнародних стандартів, таких як Zero Discharge of Hazardous Chemicals (ZDHC) [16], OEKO-TEX Standard 100 [26], Leather standard by OEKO-TEX [27] та Bluesign [12], які суворо обмежують або повністю забороняють використання тисяч небезпечних речовин у виробництві. Для забезпечення відповідальності та контролю необхідно запровадити прозорість ланцюга поставок, що вимагатиме від постачальників повного розкриття інформації про всі хімічні речовини, які вони використовують, для забезпечення абсолютної відстежуваності. Також, для інформування громадськості та стимулювання попиту на екологічну продукцію, критично важливим є створення надійних систем екологічного маркування, які чітко засвідчують екологічність як процесу фарбування, так і кінцевого виробу [28].

Використання синтетичних барвників у текстильній та шкіряній промисловості є джерелом значного екологічного забруднення та створює серйозну проблему для сталого розвитку. Щороку значна кількість барвників виробляються для текстильної та шкіряної промисловості. Близько 50% від використаної кількості не фіксується на волокні, а скидається у навколишнє середовище зі стічними водами. Для зменшення негативного впливу необхідний комплексний підхід, який включає впровадження ефективних технологій очищення стічних вод (коагуляція, зворотний осмос, адсорбція та біохімічне очищення), перехід на екологічно чистіші та біорозкладні або натуральні барвники, оптимізацію виробничих процесів для підвищення ступеня фіксації барвника та зменшення витрати води, а також законодавче регулювання та контроль за дотриманням екологічних нормативів.

Висновки. Світовий ринок барвників для шкіряної та текстильної промисловості характеризується домінуванням азійських країн, насамперед Китаєм та Індією, які є як ключовими світовими виробниками та експортерами, так і найбільшими споживачами, що підтверджується їхньою високою часткою у загальному національному експорті та на ринках збуту. Основні тенденції ринку зосереджені на екологічній стійкості та технологічних інноваціях. Спостерігається зростання попиту на екологічно чисті барвники (на водній та біологічній основі, натуральні), що відповідає суворим міжнародним регуляторним вимогам та зростаючій свідомості споживачів.

Український ринок барвників характеризується значною імпортозалежністю, про що свідчить суттєва перевага імпорту над низьким

експортом протягом 2020-2025 років. Імпорт є нестабільним, але відновлюється після різкого падіння у 2022 році (спричиненого повномасштабним вторгненням), з найбільшими обсягами поставок, що надходять з Китаю, Індії та Італії (сумарно 57% імпорту), що корелює зі світовими виробничими центрами. Експорт України є низьким, концентруючись на Грузії, США та Єгипті, що підкреслює слабкість вітчизняного експортного потенціалу у цій галузі.

Класифікація барвників для шкіряної та текстильної промисловості є комплексною і ґрунтується переважно на двох ключових критеріях: хімічній структурі (наприклад, азобарвники, антрахінонові) та, що важливіше для галузі, способах застосування і спорідненості до волокна (технічна класифікація). Саме технічна класифікація (наприклад, прямі, кислотні, реактивні, дисперсні, кубові барвники) визначає, який барвник може бути використаний для фарбування конкретного матеріалу (целюлоза, вовна, шкіра, синтетичні волокна), враховуючи необхідні технологічні умови (температуру, рН) та кінцеві вимоги до виробу (стійкість кольору, яскравість). Таким чином, ефективна класифікація дозволяє промисловості вибрати хімікати, що оптимально відповідають як хімічній природі барвника, так і кінцевому призначенню фарбованого виробу.

Синтетичні барвники широко використовуються у текстильній та шкіряній промисловості. Вони створюють значну екологічну проблему, оскільки до 50% використаної речовини не фіксується на волокнах і скидається у водні ресурси зі стічними водами. Шкода полягає не лише у візуальному забрудненні води, що перешкоджає проникненню світла, але й у викидах токсичних і часто канцерогенних сполук (важкі метали, формальдегід, ароматичні аміни), які становлять загрозу для водних екосистем та здоров'я людини. Шляхи вирішення цієї проблеми лежать у трьох площинах: впровадження ефективних, зокрема біохімічних та адсорбційних, технологій очищення стічних вод; перехід на екологічно чистіші альтернативи (натуральні, біорозкладні, барвники на водній основі); та оптимізація виробничих процесів через підвищення ефективності фарбування і застосування інноваційних технологій.

Комплексний підхід щодо аналізу ринку барвників, їх класифікацію, аналіз ефективності використання в промисловості для текстильних та шкіряних матеріалів дозволив сформулювати системну основу для розробки та впровадження ефективних заходів з екологізації шкіряного та текстильного виробництва.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Хімія барвників: Навчальний посібник / укл.: Ягодинець П. І., Скрипська О. В., Андрійчук Ю. М. – Чернівці, 2019. – 92 с
2. Бондарєва А., Мокроусова Р. Застосування гібридних пігментів у формуванні полімерномінерального покриття для оздоблення шкір. *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*. 2022. Том 2. №6(315). С. 25-31.
3. Бондарєва А. О., Касьян Е. Є., О. Р. Мокроусова. Моделювання показників якості покриття шкір. *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*.

науки. 2021. № 4. С. 115-122.

4. Арабулі С. І. Захист від шкідливого ультрафіолетового випромінювання: практичне застосування кубових барвників для функціоналізації бавовняних тканин. *Індустрія моди*. 2022. № 3-4. С. 53-61

5. Мадані М. М. Деструкція барвників у стоках текстильних виробництв. *Техногенно-екологічна безпека*. 2021. Вип. 10(2). С. 58-63. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/techecolsaf_2021_10\(2\)__11](http://nbuv.gov.ua/UJRN/techecolsaf_2021_10(2)__11)

6. T. Younas, N. Tayyaba, A. Ayub, Sh. Ali. Textile fabric's and dyes. *Tekstilna industrija*. 2021. Broj 3. P. 47-59. URL: <https://pdfs.semanticscholar.org/00a2/3b4b582d37ce05dcd4d2610fcb342e9ee904.pdf>

7. R. Altohamy, S. Samir Ali, K. Okasha та F. Li. A critical review on the treatment of dye-containing wastewater: Ecotoxicological and health concerns of textile dyes and possible remediation approaches for environmental safety. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2022. 231.P. 1-17. URL: <https://www.sciencedirect.com/journal/ecotoxicology-and-environmental-safety/vol/231/suppl/C>

8. Leather Dyes Market. URL: <https://www.marketreportsworld.com/market-reports/leather-dyes-market-14715757>

9. Textile Dyes Market Report by Dye Type. URL: <https://www.imarcgroup.com/textile-dyes-market>

10. Textile Dyes Market Size & Outlook, 2025-2033. URL: <https://straitresearch.com/report/textile-dyes-market>

11. РЕГЛАМЕНТ (ЄС) ЄВРОПЕЙСЬКОГО ПАРЛАМЕНТУ ТА РАДИ № 1907/2006 від 18 грудня 2006 року про реєстрацію, оцінку, авторизацію і обмеження хімічних речовин та препаратів (REACH), яким засновується Європейське Агентство хімічних речовин і препаратів, вносяться зміни до Директиви 1999/45/ЄС і скасовуються Регламент Ради (ЄЕС) № 793/93 і Регламент Комісії (ЄС) № 1488/94, а також Директива Ради 76/769/ЄЕС і Директиви Комісії 91/155/ЄЕС, 93/67/ЄЕС, 93/105/ЄС і 2000/21/ЄС. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/document.html?id_doc=67690

12. Sustainable Solutions for the Textile Industry. URL: <https://www.bluesign.com/en/>

13. Державна служба статистики України. Статистична інформація. URL: <https://www.ukrstat.gov.ua/>

14. Державна митна служба України. Статистика та реєстри. Статистичний експорт та імпорт товарів. Goods_country. URL: <https://customs.gov.ua/statistika-ta-reiestri>

15. Українська класифікація товарів зовнішньоекономічної діяльності. URL: <https://business.dii.gov.ua/service/uktzed>

16. Zero Discharge of Hazardous Chemicals. URL: <https://www.zdhc-gateway.com/>

17. B. Said, S.El Harfi, A. Elharfi. Classifications, properties and applications of textile dyes: A review. URL: researchgate.net/publication/323960391_Classifications_properties_and_applications_of_textile_dyes_A_review

18. Mazharul Islam Kiron. Different Types of Dyes with Chemical Structure. URL: <https://textilelearner.net/different-types-of-dyes-with-chemical-structure/>

19. Bondaryeva Anna, Mokrousova Olena, Okhmat Olena. Hybrid pigments based on montmorillonite and anionic dyes for leather finishing. *Solid State Phenomena*. 2021. Vol. 320. Pp. 198–203.

20. Leather dyes. Chemical book URL: https://www.chemicalbook.com/ProductCatalog_EN/161118.htm

21. Alois G. Püntener. Colorants for Non-Textile Applications. 11 – Leather Dyes. 2000. P. 478-557. URL:

- <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780444828880500428?via%3Dihub>
22. Пахольок О., Мартиросян І. Екологічна безпека фарбування та обробки текстильних виробів. URL: <https://evnuir.vnu.edu.ua/bitstream/123456789/22472/1/150-151.pdf>
 23. S. Benkhaya, S. M'rabet, A. El Harfi. A review on classifications, recent synthesis and applications of textile dyes. *Inorganic Chemistry Communications*. 2020. 115. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1387700320300587>
 24. Eco-Friendly Textile Dyeing and Finishing. *Textile Dyes: Dyeing Process and Environmental Impact*. 2013. Farah Maria Drumond Chequer, Gisele Augusto Rodrigues de Oliveira, Elisa Raquel Anastácio Ferraz, Juliano Carvalho Cardoso, Maria Valnice Boldrin Zanoni and Danielle Palma de Oliveira. URL: <https://www.intechopen.com/books/3137>
 25. Chandanshive V., Kadam S., Rane N., Jeon B., Jadhav J., Govindwar S. In situ textile wastewater treatment in high rate transpiration system furrows planted with aquatic macrophytes and floating phytobeds. *Chemosphere*. 252, 2020, URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0045653520307062>
 26. OEKO-TEX Standard 100. URL: <https://www.oeko-tex.com/en/our-standards/oeko-tex-standard-100/>
 27. OEKO-TEX. Leather standard by OEKO-TEX. URL: https://www.oeko-tex.com/importedmedia/downloadfiles/LEATHER_STANDARD_by_OEKO-TEX_R_-_Standard_en.%E2%80%A6
 28. U. Hasanah, Md. Mominul Islam. Natural dyes in leather technology. *Renewable Dyes and Pigments*. 1st edition. Chapter: 11. P.232-251. URL: https://www.researchgate.net/publication/374023196_Natural_dyes_in_leather_technology

3.5 ЕКОЛОГІЧНІ ПРИНЦИПИ СТАЛОГО РОЗВИТКУ ТУРИЗМУ, ЯК УМОВА РАЦІОНАЛЬНОГО ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ ТА РЕСУРСОЗБЕРЕЖЕННЯ

Худавердісва В. А.

Державний біотехнологічний університет, Україна
viki75807@gmail.com

У сучасних умовах глобальних екологічних викликів питання забезпечення сталого розвитку стає одним із ключових напрямів державної політики та міжнародного співробітництва. Туризм, як одна з найдинамічніших галузей світової економіки, водночас виступає потужним чинником соціально-економічного розвитку і значним споживачем природних ресурсів. Надмірна рекреаційна діяльність, неконтрольоване будівництво туристичної інфраструктури, деградація ландшафтів і біорізноманіття призводять до порушення екологічної рівноваги. Тому формування і впровадження екологічних принципів сталого розвитку туризму набуває особливої актуальності як в Україні, так і у світі.

Ключові слова: *ресурсозбереження, раціональне природокористування, відновлювальні джерела енергії, сталий туризм, екотуристичні стратегії.*

Актуальність теми дослідження. Сучасна концепція сталого розвитку вимагає гармонійного поєднання економічних, соціальних і екологічних аспектів діяльності людини. Туризм, що базується на раціональному природокористуванні, здатен не лише мінімізувати негативний вплив на довкілля, але й стати важливим інструментом охорони природної спадщини, збереження культурних ландшафтів та розвитку місцевих громад. В українських реаліях це питання має особливе значення, з огляду на необхідність відновлення природних територій, реформування системи екологічного управління та євроінтеграційний курс держави.

Мета дослідження полягає у науковому обґрунтуванні екологічних принципів сталого розвитку туризму як основи раціонального природокористування та ресурсозбереження, а також у визначенні шляхів їх практичного впровадження в систему туристичної діяльності України.

Об'єктом дослідження є процеси формування та реалізації екологічних принципів сталого розвитку у сфері туризму.

Предметом дослідження виступають теоретико-методологічні основи, механізми, нормативно-правові засади та практичні інструменти раціонального природокористування і ресурсозбереження в туристичній діяльності.

Наукова новизна роботи полягає у комплексному підході до аналізу екологічних принципів сталого розвитку туризму як системного чинника раціонального природокористування.

Практичне значення отриманих результатів. Результати дослідження можуть бути використані в діяльності органів державної влади та місцевого самоврядування для удосконалення політики сталого розвитку туризму, у розробленні регіональних програм раціонального природокористування, екологічного менеджменту та охорони навколишнього середовища. Матеріали дослідження також мають практичне значення для туристичних підприємств, освітніх закладів, науковців і студентів, що вивчають питання екології, туризму та сталого розвитку.

Енергоефективні технології у туристичній інфраструктурі

Туризм, який у наші дні є одним із секторів економіки, що найбільш швидко зростає, забезпечує 10% всесвітнього ВВП, 7% глобального експорту і кожне десяте робоче місце. Однак зростання йде пліч-о-пліч з відповідальністю, адже наші зусилля спрямовані на забезпечення кращого майбутнього, миру і процвітання для нашої планети і людей, що її населяють. За оцінками туризм відповідає за 5% глобальних викидів CO₂ в атмосферу. Нам необхідно перейти до по-справжньому «зеленої» економіки в туризмі, в рамках якої зростання не спричиняє руйнівного впливу на навколишнє середовище чи культуру. На туризм припадає 8% світових викидів вуглекислого газу. Підраховано, що під час літнього піку щодня виконується 34 тисячі рейсів. Це означає, що кожні три секунди літак злітає або входить до повітряного простору Європи. На авіаційну промисловість припадає 3% викидів парникових газів у всій Європі. Передбачається, що до 2050 року цей рівень збільшиться на 700%. Наслідки можуть бути незворотними не тільки у вигляді нестачі сировини, але також у вигляді зміни клімату та ушкодження навколишнього середовища. Тож якими є наслідки забруднення навколишнього середовища та викидів вуглекислого газу? Насамперед, посилення парникового ефекту, який є незначним підвищенням температури атмосфери. Результатом є танення льодовиків, підвищення рівня моря та погодні аномалії – хвилі тепла, посухи та танення вічної мерзлоти. CO₂ також викликає закислення океану. Все більше і більше країн та організацій вживають заходів, щоб зупинити ці зміни. Авіакомпанії повинні контролювати свої викиди та купувати нові, коли вони витратять свої безкоштовні квоти. Євросоюз прогнозує, що, серед іншого, завдяки таким заходам до 2030 року викиди CO₂ в авіації не перевищать 111 мегатонн на рік [1].

Технічний прогрес в авіації йде йому на користь, тому що легші літаки спалюють на 40 відсотків більше до 60 відсотків менше палива. Також проводяться випробування альтернативних видів палива, що скоротять викиди вуглекислого газу. Більше того, завдяки міжнародним положенням, з 2027 року кожен перевізник нестиме відповідальність за посадку дерев.

Всесвітня конференція «Туризм та енергія майбутнього» (World Conference Tourism and Future Energy – Reducing CO2 Emission) покликана стимулювати дискусію між лідерами галузі, підприємцями, фінансовими установами та особами, відповідальними за формування політики, для вивчення нових можливостей та новаторських рішень щодо енергії майбутнього у глобальному туристському секторі та сприяти низьковуглецевому зростанню [1]. За підсумками засідання, присвяченого енергії майбутнього в галузі розміщення та гостинності, було зроблено такі висновки:

– забезпечення сприятливих умов для низьковуглецевого зростання: для досягнення повного успіху необхідно створити фінансові, структурні, інституційні та регулюючі механізми. Існує потреба у державних політичних механізмах стратегічного характеру для приватного сектору як на міжнародному, так і на регіональному та національному рівні. Такі механізми мають бути підкріплені прихильністю власників та керівників готелів;

– підвищення якості вимірювань з метою більш ефективного управління споживанням енергії в готелях: більшість малих та середніх підприємств у туризмі не знають ні про рівень своєї стійкості, ні про свій статус щодо споживання енергії та ресурсів. Існує нагальна потреба у вимірі споживання енергії за допомогою механізмів та методів, призначених для управління споживанням енергії та контролю за таким споживанням;

– застосування нових технологій на підприємствах майбутнього: економіка спільного споживання, яка спирається на так звані «Інтернет речей» (IoT) та блокчейн-технології, стрімко змінює підходи, які застосовуватимуться до підприємницької діяльності у туризмі у майбутньому. «Розумні» підключені пристрої швидко стають конкурентними факторами у бізнесі;

– підтримка залучення до участі споживачів: неодноразово згадуване у ході всіх засідань залучення до участі споживачів, що веде до довгострокових змін у їх поведінці, необхідне досягнення цілей у сфері забезпечення стійкості. Такі ідеї зазвичай отримують потужний імпульс при використанні цифрових та інших нових технологій, які сприяють поширенню демократичного мислення та культури та створенню відповідного середовища, а також поєднують у собі фінансову стійкість та соціальний, екологічний та економічний вплив.

За підсумками засідання, присвяченого низьковуглецевим моделям сталого туризму, було зроблено такі висновки:

- Ключова роль державної підтримки: цей підхід є необхідною умовою для ефективного використання ресурсів, охорони навколишнього середовища та боротьби зі зміною клімату у багатьох країнах. Підтримка може охоплювати заходи політики, дорожні карти, кампанії щодо підвищення поінформованості у ЗМІ, використання чистої енергії та «зелений» туризм, а також ініціативи щодо нарощування потенціалу, спрямовані на підвищення поінформованості суспільства;

- Здобути уроки з позитивного досвіду та застосування передової практики: необхідно заохочувати та поширювати досвід модернізації існуючих інфраструктур, такий як пілотні готелі, представлені у проєкті «Готелі з майже нульовим споживанням енергоспоживанням» (neZEN). Досвід авіаційної галузі, що активно розвивається, свідчить про те, що зростання може збалансовано поєднуватися з зобов'язаннями щодо стримування впливу на клімат;

- Розширення можливостей зацікавлених сторін за допомогою співробітництва: управління стійкістю є одним із найефективніших підходів, спрямованих на зниження вуглецевих викидів у галузі. Усі її учасники повинні вимірювати та відстежувати свій вуглецевий слід та дії, спрямовані на подолання негативного впливу такого сліду, та налагодити безперервне довгострокове управління своєю діяльністю із забезпечення стійкості з урахуванням обов'язкових цільових показників скорочення викидів;

- Поширення інформації про переваги стійкого туризму: багато організацій та державних установ позиціонують себе як поборників стійкості, проте лише деякі з них застосовують на практиці те, до чого закликають. Стійкий розвиток не тільки сприяє скороченню операційних витрат та підвищенню енергетичної ефективності, а й відповідає запитам споживачів та підвищує їхню лояльність.

- Низьковуглецевому туристському сектору, орієнтованому як на зростання, так і на стійкість, необхідна повномасштабна, послідовна участь кластерів розміщення, повітряного та наземного транспорту. Величезна роль у вирішенні цих питань відводиться інноваціям у сфері використання енергії та її джерел, зокрема поновлюваним джерелам енергії. Всесвітня туристична організація (ЮНВТО) втілює цю концепцію за допомогою таких проєктів, як ініціатива «Готелі з майже нульовим енергоспоживанням» (neZEN) [2].

- Доступ до енергії допомагає дітям навчатися у вечірній час, фермерам отримувати більше врожаю, а лікарням забезпечувати кращий догляд. Крім того, він забезпечує цілодобовий рух поїздів, дає можливість готелям щорічно приймати тисячі туристів і, звичайно, літакам переносити нас до нових, незнайомих країн, щоб ми могли більше дізнатися про прекрасний світ, у якому живемо/

Оскільки готелі є другим за значенням споживачем енергії у галузі туризму, надзвичайно важливо, щоб підприємства, які надають послуги з розміщення, скоротили свої викиди та використовували відновлювану енергію. Є переконливі економічні аргументи на користь скорочення викидів готельною промисловістю: перехід до низьковуглецевим моделям забезпечить затратоефективність діяльності, одночасно стимулюючи конкурентоспроможність. Існують енергоефективні технології, які полегшують подібні перетворення, та вдосконалені передові методи проектування готелів та їх експлуатації. Проте задля досягнення повного

успіху ринок має забезпечити сприятливі умови для низьковуглецевого зростання, зокрема фінансові, структурні, інституційні та нормативно-правові механізми. У той же час малі та середні готелі, які у Європі утворюють 90% сектору гостинності, мають отримати в своє розпорядження адекватну та легкодоступну інформацію про низьковуглецеві моделі діяльності, а також доступ до незалежних технічних консультацій та фінансової підтримки. Заходи щодо підвищення поінформованості із залученням до участі споживачів та використанням цифрових технологій дозволять досягти необхідних змін у поведінці та відношенні людей до цієї проблематики.

Перед туристським сектором стоїть термінове завдання і одночасно відкриваються широкі можливості, пов'язані з тим, щоб стати одним із лідерів у галузі скорочення викидів CO₂ та активним учасником менш вуглецевої економіки середини двадцять першого століття. Для цього необхідні стратегічні політичні механізми, що підтримуються національними урядами та міжнародними організаціями, ефективні системи для вимірювання викидів та подання звітності, а також схеми, що дозволяють туристським компаніям досягати цілей у галузі зниження викидів [1].

Сталий розвиток туризму вимагає формування нової парадигми управління енергоспоживанням, що ґрунтується на принципах енергоефективності, декарбонізації та мінімізації антропогенного впливу на довкілля. Критерії Глобальної ради зі стійкого туризму (GSTC) були розроблені для забезпечення загального розуміння сталого туризму (табл. 1). GSTC-D було розроблено для дестинацій. Всесвітня туристична організація (ЮНВТО) дає таке визначення дестинації: «Фізичний простір з або без адміністративних та/або аналітичних кордонів, у межах яких відвідувач може зупинитися на ніч. Це кластер (спільне розташування) продуктів та послуг, а також видів діяльності та вражень у туристичному ланцюжку створення доданої вартості та основна одиниця аналізу туризму. Дестинація включає різні зацікавлені сторони і може поєднуватися з іншими для формування більших дестинацій. Критерії відносяться не до одного об'єкта, а до певного місця з назвою, що може бути однозначно ідентифіковано. Критерії просто вимагають, щоб описана умова належала до даної дестинації, незалежно від того, який орган може нести за нього відповідальність, а також від того, яким чином і ким здійснюється будь-яка пов'язана з цим дія. Застосування критеріїв допоможе дестинації зробити свій внесок у реалізацію Порядку денного в галузі сталого розвитку до 2030 року та 17-ти цілей сталого розвитку. Кожен з цих критеріїв відображає один або кілька з 17 ЦСР, з якими він найбільш тісно пов'язаний [4].

Туристична інфраструктура – готелі, заклади харчування, транспорт, об'єкти дозвілля – належить до секторів, які споживають значні обсяги енергетичних ресурсів, зокрема електроенергії, тепла, води та палива. За даними Програми ООН з довкілля [5], на частку туристичного сектору припадає близько 8 % глобальних викидів парникових газів, що зумовлює необхідність упровадження систем енергоменеджменту на всіх рівнях

туристичної діяльності. Одним із ключових напрямів підвищення енергоефективності у сфері туризму є модернізація інженерно-технічних систем туристичних об'єктів. У готельному господарстві активно впроваджуються технології автоматизованого енергоконтролю, зокрема «розумні системи» (Smart Building Systems), які оптимізують споживання електроенергії, тепла й кондиціонування залежно від завантаженості номерного фонду. Такі рішення забезпечують скорочення енергоспоживання на 25–40 % без втрати комфорту для гостей. У сучасних готелях класу «еко» застосовуються світлодіодні системи освітлення з датчиками руху, теплові насоси, сонячні колектори для підігріву води, фотовольтаїчні панелі, що дозволяє частково або повністю перейти на автономне енергозабезпечення [6].

У транспортному компоненті туристичної інфраструктури помітна тенденція до електрифікації мобільності – використання електротранспорту, велосипедних систем, гібридних екскурсійних автобусів. З 2023 р. у низці туристичних центрів Європи та України (зокрема у Львові, Кам'янці-Подільському, Києві) реалізуються програми «Green Mobility» (<https://www.greenmobilityltd.com/>), що сприяють зниженню викидів CO₂ та підвищенню енергоефективності міського туризму.

Не менш важливим є впровадження систем сертифікації енергоефективності у туристичних об'єктах. Міжнародні стандарти LEED, BREEAM, Green Key, EU Ecolabel стали орієнтиром для готельного бізнесу, що прагне підтвердити відповідність принципам сталого розвитку. LEED (*Leadership in Energy and Environmental Design, LEED*) – один з найбільш поширених видів добровільної сертифікації екологічного будівництва або будівництва, розроблений у США в 1998 році [7]. BREEAM (*Building Research Establishment Environmental Assessment Method – Метод оцінки екологічної ефективності будівель*) – провідний і найбільш широко вживаний метод оцінки екологічної ефективності будівель, розроблений в 1990 році британською компанією BRE Global (*Building Research Establishment*). У рамках цього методу розроблений стандарт екоефективного проектування, який є визнаною основою для опису екологічних характеристик будівель. Метод екологічної оцінки ефективності будинків (BREEAM) – добровільний рейтинг оцінки зелених будівель, розроблений 1990 року британською організацією BRE Global для оцінки екологічної ефективності будівель [8]. Green Key International (<https://www.greenkey.global/>) – це міжнародна екологічна сертифікація для підприємств розміщення та інших об'єктів гостинності, які дотримуються принципів сталого розвитку. Сертифіковані об'єкти відповідають строгим критеріям, підтвердженим незалежними перевірками на місцях. EU Ecolabel – Екомаркування ЄС або Квітка ЄС – це добровільна схема екомаркування, створена Європейським Союзом у 1992 році. За межами Великобританії на сьогоднішній день сертифіковано понад 200 тис. будівель та близько мільйона перебувають у процесі сертифікації [9].

Таблиця 1. GSTC критерії DESTINATION (версія 2.0)

Критерії	Індикатори
РОЗДІЛ D: Екологічна стійкість	
D(a) Збереження природної спадщини	
D1 Захист екологічно вразливих середовищ	У DESTINATION існує система моніторингу, вимірювання та реагування впливу туризму на навколишнє середовище, збереження довкілля, біологічних видів та екосистем
D2 Керування відвідувачами природних об'єктів	DESTINATION має систему управління відвідувачами всередині та навколо природних об'єктів, яка враховує їх характеристики, ємність та чутливість та прагне оптимізувати потік відвідувачів та мінімізувати несприятливі впливи
D3 Взаємодія з дикою природою	DESTINATION має систему, що забезпечує дотримання місцевих, національних та міжнародних законів та стандартів взаємодії з дикою природою
D4 Експлуатація видів та благополуччя тварин	У DESTINATION є система забезпечення дотримання місцевих, національних та міжнародних законів та стандартів, спрямованих на забезпечення добробуту тварин та збереження видів
D(b) Управління ресурсами	
D5 Енергозбереження	У DESTINATION є цільові показники зниження енергоспоживання, підвищення ефективності його використання, а також збільшення використання відновлюваних джерел енергії
D6 Управління водними ресурсами	DESTINATION заохочує підприємства до вимірювання, моніторингу, публічного звіту та управління водокористуванням. Водний ризик у DESTINATION оцінюється та документується
D7 Якість води	DESTINATION здійснює моніторинг якості води для питних, рекреаційних та екологічних цілей із використанням стандартів якості
Україна Управління відходами та викидами	
D8 Відпрацьована вода	У DESTINATION діють чіткі та обов'язкові керівні принципи щодо розміщення, технічного обслуговування та тестування скидів із септиків та систем очищення стічних вод.
D9 Тверді побутові відходи	DESTINATION вимірює та звітує про утворення відходів та встановлює цільові показники щодо їх скорочення.
D10 Викиди парникових газів	DESTINATION має цільові показники щодо скорочення викидів парникових газів, а також здійснює та звітує про політику та дії щодо пом'якшення наслідків
D11 Транспорт з низьким рівнем викидів	У DESTINATION є цілі щодо скорочення транспортних викидів внаслідок поїздок у DESTINATION та всередині неї.
D12 Світлове та шумове забруднення	У DESTINATION є інструкції та правила, спрямовані на мінімізацію світлового та шумового забруднення

Джерело: *Destination Criteria. Version 2.0, December 6, 2019. With performance indicators and SDGs. Global Sustainable Tourism Council. <https://www.gstc.org/wp-content/uploads/GSTC-Destination-Criteria-v2.0.pdf>*

В Україні з 2022 р. діє оновлений ДСТУ ISO 50001:2019 «Системи енергетичного менеджменту», який стимулює туристичні підприємства впроваджувати внутрішній контроль за енергоспоживанням, проводити енергетичний аудит та планувати заходи зі зменшення витрат [10].

Важливу роль у зниженні енерговитрат відіграють цифрові технології управління ресурсами. Використання Інтернету речей (IoT) та хмарних платформ дає змогу у режимі реального часу аналізувати енергетичні потоки, прогнозувати пікові навантаження та оптимізувати роботу обладнання. Досвід готельних мереж Marriott, Hilton та Accor демонструє, що впровадження систем моніторингу енергоспоживання дозволяє скоротити витрати до 30 %, а в окремих випадках – навіть до 50 %.

Окрему увагу слід приділити локальним ініціативам з енергозбереження у сфері туризму України. Після розроблення Концепції «зеленого» енергетичного переходу України до 2050 року [11], туристичні об'єкти отримали можливість долучитися до державних програм підтримки енергоефективних заходів. Зокрема, у курортних регіонах Карпат і Причорномор'я впроваджуються пілотні проекти «Екотуризм 2030», які передбачають використання біоенергетичних котелень, систем рекуперації тепла, дощових колекторів та технологій утилізації органічних відходів для виробництва біогазу.

Використання енергоефективних технологій сприяє не лише зменшенню витрат туристичних підприємств, а й підвищенню їх конкурентоспроможності на світовому ринку. За даними Всесвітньої ради з туризму та подорожей (WTTC, 2024), понад 60 % туристів у розвинених країнах віддають перевагу об'єктам, що мають «зелений» сертифікат або демонструють зниження вуглецевого сліду. Таким чином, екологічна модернізація туристичної інфраструктури перетворюється на економічну перевагу та чинник брендової стійкості. Впровадження енергоефективних технологій у туристичній інфраструктурі є ключовою умовою переходу до моделі сталого туризму. Цей процес вимагає системної підтримки на державному рівні, фінансового стимулювання «зелених» інвестицій, підготовки фахівців з енергоменеджменту у сфері туризму та формування екологічної свідомості серед споживачів туристичних послуг.

Використання відновлюваних джерел енергії в туризмі

В умовах глобальних викликів зміни клімату та необхідності збереження природних ресурсів, впровадження відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) в туристичну інфраструктуру стає важливим кроком до сталого розвитку галузі. Інтеграція відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) у туристичну інфраструктуру – один із ключових компонентів переходу галузі до моделі сталого розвитку. Перехід на ВДЕ забезпечує одночасне досягнення декількох цілей: зниження вуглецевого сліду туристичного сектора, підвищення енергетичної безпеки об'єктів (особливо у віддалених і курортних регіонах), зменшення експлуатаційних витрат і посилення конкурентоспроможності за рахунок «зеленого» іміджу. На глобальному рівні посилення ролі ВДЕ підтверджується звітами міжнародних

організацій, що фіксують технологічний прогрес і необхідність масштабного розгортання ВДЕ для виконання національно визначених внесків (NDCs) [12].

У практичному застосуванні для туристичної інфраструктури найважливішими є такі види відновлюваних джерел енергії:

1. Сонячна енергетика (фотовольтаїка, сонячні колектори) – резервні та основні джерела електропостачання для невеликих готелів, кемпінгів, інформаційних центрів, пікові генератори для систем гарячого водопостачання. Встановлення сонячних панелей на дахах готелів, ресторанів та інших туристичних об'єктів дозволяє генерувати електрику для освітлення, опалення та кондиціонування. Наприклад, у Канарських островах Іспанії сонячна енергія використовується для живлення готелів, ресторанів та навіть громадського транспорту [13].

2. Вітрові установки — локальні вітроелектростанції доцільні для прибережних і гірських туристичних зон із відповідним ресурсом. Вітрові турбіни можуть забезпечувати енергопостачання віддалених туристичних об'єктів, зокрема на островах чи в гірських районах.

3. Геотермальні системи та теплові насоси — застосовуються для опалення, кондиціонування і підігріву води (особливо ефективні в гірських/вулканічних регіонах і курортних комплексах із джерелами геотермальної енергії). Використання геотермальних насосів для обігріву та охолодження приміщень є ефективним рішенням для готелів та спа-комплексів. Наприклад, у Китаї готель Universal Beijing Resort працює повністю на сонячній та вітровій енергії [14].

4. Малі гідроенергетичні установки — для туристичних зон у гірських річках: забезпечують стабільне базове навантаження при мінімальних викидах.

5. Біоенергетика (біогаз, пелети, комбіновані установки) — переробка органічних відходів готелів/ресторанних комплексів у тепло/електроенергію, що вирішує проблему утилізації сміття та знижує залежність від викопних палив. Використання біомаси для виробництва тепла та електрики може бути ефективним у сільських та гірських районах, де є доступ до органічних відходів.

Кожна технологія має свої оптимальні сценарії застосування: наприклад, сонячні панелі та акумулятори — найпростіший шлях «зеленого» переходу для окремих гостьових будинків; мікромережі з комбінацією фото + акумулятор + генератор забезпечують енергетичну стійкість віддалених курортів.

Конструктивні моделі впровадження ВДЕ у туризмі можна поділити на рівні від окремого готелю до регіональної мікро мережі:

- Об'єктовий рівень — автономні системи на готелі/курорті (PV-панелі, сонячні колектори, теплові насоси, біогазові установки).
- Кластерний рівень — спільні енергосистеми для групи об'єктів (наприклад, селище, курортний комплекс) з централізованим управлінням (мікромережа).

- Регіональний/національний рівень — інтеграція туризму у загальну енергетичну політику регіону: підключення до мережі ВДЕ, комерційні PPA (Power Purchase Agreements) та програми державної підтримки.

Кластерні й регіональні моделі особливо актуальні для островів та віддалених курортів: прикладом успішного застосування регіональної моделі є проект на острові Ель-Іерро (Канарські острови), де поєднання вітроенергетики й накопичення гідроакumuлюючої енергії забезпечило значну частку електропостачання для населення й турсектора та стало прикладом енергонезалежності [15].

Інтеграція ВДЕ в туристичні об'єкти приносить низку переваг:

1. Зниження вуглецевого сліду — прямий внесок у досягнення кліматичних зобов'язань готелів і регіонів, що підвищує привабливість для екологічно орієнтованих туристів. (Дані ООН/UNEP наголошують на критичній ролі ВДЕ для досягнення цілей скорочення викидів) [12]. Після початкових інвестицій у встановлення ВДЕ, експлуатаційні витрати значно знижуються завдяки безкоштовним або низьким витратам на енергію. Використання ВДЕ сприяє зниженню викидів CO₂, що важливо для боротьби зі зміною клімату.

2. Енергетична автономність і стійкість — особливо цінна для віддалених курортів та об'єктів, які піддаються ризику порушень централізованого енергопостачання. Особливо в віддалених районах, де підключення до централізованих енергомереж є складним або дорогим, ВДЕ забезпечують автономне енергопостачання.

3. Економічні вигоди — зниження операційних витрат у середньо- і довгостроковій перспективі; потенціал для створення додаткових джерел доходу (продаж надлишків енергії під час міжсезоння).

4. Управління відходами — біоенергетичні рішення дозволяють одночасно вирішувати питання утилізації органіки та виробництва енергії.

5. Підвищення іміджу та маркетингові переваги – сертифікати та «зелений» профіль збільшують привабливість для частини туристичної аудиторії [16]. Туристи все більше обирають екологічно чисті об'єкти. Впровадження ВДЕ дозволяє підвищити привабливість об'єкта для свідомих споживачів.

Всесвітня рада з подорожей і туризму (WTTC) повідомляє: понад 5000 готелів у понад 80 країнах світу вже прийняли її програму «Основи сталого розвитку готелів» (Basics). Готелі у великих містах Європи, Африки, Америки та Азіатсько-Тихоокеанського регіону перейняли «Basics», і програма продовжує отримувати глобальну підтримку завдяки новим партнерствам у туристичних гігантах, таких як Японія, Філіппіни та Індія.

Basics – це незалежна програма верифікації, розроблена для того, щоб допомогти готельєрам у їхніх перших кроках до підвищення сталого розвитку, яка контролюється відомими оцінювачами Green Key та SGS, що забезпечує дотримання суворих стандартів та надійності. Програма надає готелям усіх розмірів комплексні 12-етапні критерії, спрямовані на

скорочення викидів вуглецю, управління енергією, водою та відходами, а також на забезпечення того, щоб місцеві громади отримували вигоду від роботи готелів. Провідні готельні бренди, включаючи Jin Jiang, одну з найбільших готельних груп світу, європейський гігант Louvre Hotels Group, Choice Hotels, Radisson Hotel Group та Accor, перейняли «Basics». Японська рада з туризму співпрацює з WTTC через свою Ініціативу сталого туризму Японії (JSTi) для підтримки запуску Basics по всій країні. Пілотна програма створює основу для поширення ініціативи на всіх японських постачальників послуг розміщення. На Філіппінах Tajara Hospitality Group та Greenview співпрацюють зі світовою туристичною організацією щодо запуску Basics на ринку через свій щорічний захід зі сталого гостинності PhilHost. Basics також планує розширитися по всій Індії за підтримки членів WTTC The Indian Hotels Company Limited, Radisson India, WTTC India Initiative, Hotel Association of India та провідного онлайн-турагентства країни MakeMyTrip. Travel + Leisure тепер є офіційним прихильником, допомагаючи використовувати Hotel Sustainability Basics у своєму портфоліо з понад 245 об'єктів. Щоб задовольнити міжнародний попит, Basics тепер також доступний кількома мовами, пропонуючи вичерпні ресурси англійською, французькою, іспанською та японською мовами. Джулія Сімпсон, президент і генеральний директор WTTC, заявила: «Основи сталого розвитку готелів WTTC є потужним свідченням наших спільних зусиль у просуванні сталих практик у сфері гостинності. Перевищення позначки в 5000 перевірених об'єктів – це більше, ніж просто важлива подія; це демонструє готовність туристичної галузі до глобального розвитку. Ця ініціатива об'єднує готелі, галузевих партнерів та стандарти сталого розвитку для створення стійкого, відповідального та екологічно чистого майбутнього» [16].

Незалежні компанії з управління готелями та унікальні постачальники послуг розміщення також зробили свої перші кроки в напрямку сталого розвитку, дотримуючись критеріїв «Basics». Alerp Hospitality, найбільша незалежна компанія з управління готелями на Близькому Сході та в Африці, Sanctuary Retreats від Abercrombie and Kent, розкішні африканські сафари-лоджі та інші, зараз розпочинають другий рік перевірки.

Незважаючи на переваги, впровадження ВДЕ у туристичну сферу України стикається з об'єктивними бар'єрами:

- Капітальні вкладення – початкові інвестиції у ВДЕ (особливо у складні мікромережеві рішення, накопичувачі) можуть бути значними для малих і середніх підприємств.
- Регуляторні перешкоди – нерідко відсутність сприятливих тарифів, складності при підключенні до мережі, бюрократичні бар'єри для отримання грантів/пільг. Це особливо помітно в країнах із нестабільною енергетичною політикою. За заявою уряду, Україні знадобиться 20 мільярдів доларів інвестицій для розвитку сектору відновлюваної енергетики згідно з планом, який має на меті збільшити її частку в

енергетичному балансі країни до 27% до 2030 року. Енергетичний сектор країни втратив половину своїх генеруючих потужностей в результаті російських ракетних атак та атак безпілотників, які посилюються навесні 2024 року, що змусило її покладатися на свої атомні електростанції, а також сонячну та вітрову енергетику. План, затверджений урядом, має на меті додати близько 10 000 мегават нових генеруючих потужностей. Частка відновлюваної енергії в системах тепло- та холодопостачання має досягти 33%, у виробництві електроенергії – 29%, а в транспортному секторі – 17% до 2030 року, повідомив уряд. Місцеві ЗМІ повідомляли, що вона становить 10%. Уряд також заявив, що оголосить кілька тендерів на будівництво нових генеруючих потужностей потужністю 700 мегават та від 5 до 80 мегават. Нові об'єкти мають бути введені в експлуатацію до кінця 2027 року. Атомна енергетика є найбільшим джерелом низьковуглецевої енергії в Україні, але її електростанції стали об'єктом побоювань щодо безпеки під час війни з Росією [17].

- Обмеженість місцевих ресурсів – не кожна туристична локація має достатні сонячні, вітрові або гідроресурси для рентабельної генерації.

- Конфлікти використання територій – великі електростанції (наприклад, наземні вітропарки чи сонячні ферми) можуть суперечити збереженню ландшафтних/екологічних цінностей туристичних зон. Наукові праці підкреслюють потребу узгодження енергетичних проєктів із охороною природи та культурної спадщини [18].

Приклади / кейси успішного впровадження ВДЕ в туристичній галузі: Острів Ель-Херро, Канарські острови, Іспанія: Цей острів став прикладом енергетичної самодостатності завдяки використанню вітрової та гідроенергії. Вітрові турбіни забезпечують електрику, а надлишкова енергія використовується для закачування води в резервуари, що дозволяє виробляти енергію вночі [15]. Універсальний курорт Universal Beijing Resort, Китай: Цей курорт працює повністю на сонячній та вітровій енергії, що дозволяє значно знизити викиди CO₂ та експлуатаційні витрати [19]. Село Дхудмарас, Індія: Це село, розташоване в національному парку Кангера, стало зразком сталого туризму завдяки впровадженню сонячного освітлення, систем водопостачання та освітлення, що працюють на сонячній енергії [20]. Готель H10 Suites Lanzarote Gardens, Іспанія: Цей готель активно використовує ВДЕ, зокрема сонячну енергію, для забезпечення своїх енергетичних потреб, а також проводить освітні кампанії для гостей щодо енергозбереження [21]. Ель-Іерро (Канарські острови) – довготривалий проєкт поєднання вітру та гідроакумулювання як приклад енергетичної автономності острова та позитивного впливу на туризм: острів став демонстраційним майданчиком енергоефективності і стійкого розвитку [15]. Китай: курортні комплекси й аеропорти приклади останніх років демонструють застосування геотермальних теплових насосів та широкомасштабних PV-комплексів у великих туристичних об'єктах та транспортній інфраструктурі; державні програми стимулюють такі проєкти [17].

Україна після ухвалення стратегічних документів із підтримки ВДЕ Україна анонсувала плани значного збільшення потужностей ВДЕ до 2030 р.; у туристичних регіонах зростає інтерес до сонячних систем, біоенергетики й мікромереж у нових курортних проєктах (приклади нових курортів у Карпатах у 2024–2025 рр. включають проєкти з використанням ВДЕ у проєктних рішеннях) [17]. Впровадження відновлюваних джерел енергії в туристичній інфраструктурі не лише сприяє збереженню навколишнього середовища, але й приносить економічні вигоди та підвищує конкурентоспроможність об'єктів. Успішні приклади з різних куточків світу демонструють ефективність таких ініціатив та можуть слугувати орієнтирами для інших регіонів, зокрема для України.

Для прийняття інвестиційних рішень потрібно застосовувати багатовимірну оцінку: аналіз життєвого циклу (LCA), оцінка термінів окупності (payback period), внутрішньої норми прибутку (IRR) та чутливості до вартості енергії й тарифів. UNEP та інші організації вказують, що при правильному проєктуванні PV-системи та теплових насосів термін окупності для готельних об'єктів у помірному кліматі часто лежить у межах 5–10 років, що робить інвестицію економічно обґрунтованою з урахуванням податкових пільг та грантів. Крім того, LCA показує значні скорочення викидів CO₂ порівняно з традиційними системами опалення й генерації електроенергії [22, 23].

Інтелектуальні енергосистеми (IoT-датчики, SCADA, хмарні платформи) дозволяють в режимі реального часу відстежувати виробництво та споживання ВДЕ, прогнозувати потреби і управляти накопичувачами. Такі системи підвищують ефективність використання ВДЕ, зменшують втрати та дозволяють оптимізувати тарифи й продаж надлишків енергії в мережу. Впровадження цифрового енергоменеджменту вже показало економію до 20–30 % енергії на об'єктах великої мережі [24].

Ефективне поширення ВДЕ у туризмі вимагає поєднання політичних заходів та фінансових інструментів: державні програми субсидій і грантів для «зелених» інвестицій у регіонах курортного значення; пільгове оподаткування та інвестиційні кредити з низькою ставкою; підтримка через механізми РРА та зелений тариф – можливість продавати надлишки енергії до мережі. Публічно-приватне партнерство (ППП) для масштабних регіональних проєктів (мікромережі, централізовані установки біоенергетики). Державні стратегії декарбонізації (зокрема приклади оновлених планів у країнах ЄС та Україні) створюють додаткові стимули для вкладень у ВДЕ – важливо, щоб туристичні підприємства були включені у цілеспрямовані програми підтримки [17]. Застосування ВДЕ в туристичній сфері має мультиплікативний вплив: створюються робочі місця (монтаж, обслуговування), стимулюється локальна економіка (локальні постачальники технологій), підвищується привабливість регіону для екотуризму. Водночас проєкти потребують екологічної оцінки (EIA) та залучення громад для уникнення конфліктів щодо використання ландшафтів і природних ресурсів. Наукові огляди також вказують на

потребу уникати «зеленої ілюзії» (greenwashing) – важливо поєднувати технічні заходи з прозорою звітністю та сертифікацією.

Рекомендації для практичного впровадження ВДЕ в туристичній галузі (5-крокова дорожня карта):

1. Оцінка потенціалу та передпроектні дослідження – енергетичний аудит, аналіз ресурсів (сонце/вітер/біомаса), LCA.

2. Пілотні проекти – запуск малого пілоту (наприклад, PV + акумулятор) на 1–2 об'єктах для відпрацювання технічних та економічних рішень.

3. Фінансове планування – поєднати власні кошти з грантами, «зеленими» кредитами та механізмами PPA.

4. Інтеграція цифрових систем управління- встановлення платформ моніторингу й енергоменеджменту.

5. Комунікація та сертифікація – прозоре інформування споживачів, участь у програмах сертифікації (Green Key, LEED тощо) і регулярна звітність про економію та зниження викидів.

Використання відновлюваних джерел енергії в туризмі – стратегічна необхідність і водночас конкурентна перевага. Технологічний потенціал (сонячна та вітрова енергетика, геотермальні системи, біоенергетика) у поєднанні з цифровими інструментами й адекватною політично-фінансовою підтримкою дозволяє створювати енергоефективні, стійкі й економічно привабливі туристичні продукти. Для успіху потрібна інтегрована політика, локальні пілоти, доступ до фінансування та прозора сертифікація, що разом зменшить екологічний слід сектору та підвищить його стійкість до зовнішніх шоків [22].

Екологічні стандарти та сертифікація туристичних підприємств

Екологічні стандарти та сертифікація є важливими інструментами сталого розвитку туристичної галузі. Вони сприяють збереженню природних ресурсів, підвищенню ефективності використання енергії та води, зменшенню відходів і забруднення довкілля, а також покращенню іміджу туристичних підприємств. Цей розділ розглядає основні екологічні стандарти та сертифікаційні системи, що застосовуються в туристичній сфері, їх переваги та вплив на розвиток сталого туризму.

У міжнародній практиці застосовуються різноманітні стандарти та сертифікаційні системи, що сприяють впровадженню екологічно сталих практик у туристичній діяльності. ISO 14000 – міжнародний стандарт, що містить вимоги до системи екологічного управління (environmental management system), за якими відбувається сертифікація. ISO 14001 – Міжнародний стандарт, що визначає вимоги до системи екологічного менеджменту. Він допомагає організаціям знижувати негативний вплив на довкілля, виконувати законодавчі вимоги та досягати постійного поліпшення екологічної ефективності. ISO 50001 – Стандарт, що встановлює вимоги до системи енергетичного менеджменту. («Energy management systems – Requirements with guidance for use») – міжнародний стандарт, створений Міжнародною організацією зі стандартизації для

управління енергосистемами, який визначає вимоги для встановлення, впровадження, супроводу та покращення системи енергоменеджменту, мета якої — дозволити організації слідувати системному підходу у досягненні послідовного покращення енергосистеми енергоспоживання [25]. Він сприяє підвищенню енергоефективності та зменшенню витрат на енергію в організаціях. GSTC (Global Sustainable Tourism Council) – Глобальна рада зі сталого туризму розробила критерії та індикатори для оцінки сталості туристичних підприємств. Вони охоплюють екологічні, соціальні та економічні аспекти діяльності. Зелений ключ (Green Key) – Міжнародна програма екологічного маркування для туристичних об'єктів, що підтверджує їх відповідність високим екологічним стандартам. Зелений глобус (Green Globe) – Міжнародна сертифікаційна програма, що оцінює екологічну ефективність туристичних підприємств та їхніх ланцюгів постачання. EarthCheck – Програма, що пропонує сертифікацію та консалтингові послуги для туристичних підприємств, спрямовані на зменшення їхнього впливу на довкілля.

В Україні також розроблено національні стандарти, зокрема: ДСТУ ISO 14001:2015 – Національний стандарт, що відповідає міжнародному ISO 14001; ДСТУ ISO 50001:2018 – Національний стандарт, що відповідає міжнародному ISO 50001; ДСТУ ISO 13009:2016 – Стандарт, що встановлює вимоги та рекомендації з експлуатації пляжів; ДСТУ ISO 17680:2016 – Стандарт, що встановлює вимоги до послуг у центрах таласотерапії; ДСТУ ISO 17679:2017 – Стандарт, що встановлює вимоги до обслуговування велнес та СПА-послуг. Впровадження екологічних стандартів та отримання відповідних сертифікатів надає туристичним підприємствам низку переваг:

- Покращення іміджу та конкурентоспроможності: Сертифікація свідчить про відповідальне ставлення підприємства до довкілля, що приваблює екологічно свідомих туристів.

- Зниження витрат: Впровадження енергоефективних та ресурсозберігаючих технологій дозволяє зменшити витрати на енергію та воду, а також знизити обсяги відходів.

- Доступ до нових ринків: Наявність сертифікатів відкриває можливості для співпраці з міжнародними партнерами та участі в екологічних ініціативах.

- Відповідність законодавчим вимогам: Сертифікація допомагає підприємствам відповідати національним та міжнародним екологічним вимогам та стандартам.

- Підвищення задоволеності клієнтів: Туристи, обираючи сертифіковані об'єкти, можуть бути впевнені в їхній екологічній безпеці та сталості.

Впровадження екологічних стандартів та сертифікації сприяє розвитку сталого туризму через:

- Збереження природних ресурсів: Ефективне використання енергії та води, зменшення відходів допомагає зберігати природні ресурси для майбутніх поколінь.

- Підтримку місцевих громад: Сталий туризм сприяє розвитку місцевих громад через створення робочих місць та підтримку місцевої економіки.

- Освіту та підвищення обізнаності: Сертифікація сприяє підвищенню обізнаності туристів та підприємств щодо важливості сталого розвитку та охорони довкілля.

- Інновації та технологічний розвиток: Впровадження нових технологій та практик дозволяє підприємствам бути більш ефективними та конкурентоспроможними.

- Залучення інвестицій: Сертифіковані підприємства мають більші шанси на залучення інвестицій та фінансування для розвитку сталих ініціатив.

Успішні приклади екологічної сертифікації в туристичній сфері свідчать про ефективність таких ініціатив у досягненні сталого розвитку та збереженні довкілля.

«Зелені» інновації у сфері гостинності

Сучасна туристична та готельна індустрія перебуває під тиском глобальних екологічних викликів: зміни клімату, деградація природних ресурсів, зростання попиту на екологічно чисті та відповідальні продукти. У цьому контексті «зелені» інновації стають не просто модним трендом, а стратегічною необхідністю для забезпечення стійкості та конкурентоспроможності туристичних підприємств. «Зелені» інновації у сфері гостинності охоплюють широкий спектр технологічних, управлінських та сервісних рішень, які дозволяють оптимізувати використання ресурсів, мінімізувати негативний вплив на довкілля та підвищити привабливість об'єктів для свідомих туристів. «Зелені» інновації у сфері гостинності:

1. Енергоефективні технології та ВДЕ. Впровадження енергоефективних рішень та відновлюваних джерел енергії є ключовим напрямом зелених інновацій: сонячні колектори та панелі – генерація електроенергії та нагрів води; геотермальні теплові насоси – опалення та охолодження з мінімальним енергоспоживанням; LED-освітлення та системи «розумного» управління енергоспоживанням – автоматичне регулювання освітлення та клімату; міні-вітерокollektori та біоенергетичні установки – локальне забезпечення енергією відновлюваного походження.

2. Водозберігаючі інновації: системи з повторним використанням води (recycling gray water) для поливу, технічних потреб, пралень; сенсорні змішувачі та душові системи з економією води; розумне управління поливом зелених зон і садів на території готелів.

3. Управління відходами та циркулярна економіка: компостування та переробка органічних відходів у добрива або біогаз; сортування та утилізація пластику та паперу на території об'єктів; зменшення

одноразових матеріалів – впровадження багаторазових контейнерів, предметів гігієни та посуду.

4. Еко-дизайн та матеріали з низьким впливом на довкілля: використання еко-матеріалів у будівництві та ремонті: дерево, бамбук, перероблені композити; біорозкладні та нетоксичні покриття для внутрішнього оздоблення; зелена архітектура: зелені дахи, вертикальні сади, фасади з рослинністю для поліпшення мікроклімату та зменшення енергоспоживання.

5. Цифрові та «розумні» технології: системи моніторингу енергоспоживання та водопостачання в режимі реального часу; інтелектуальні платформи управління кліматом та ресурсами; мобільні додатки для гостей, що інформують про екологічні практики готелю та стимулюють свідоме споживання.

6. Соціальні та освітні інновації: екологічне навчання персоналу та гостей: тренінги, інформаційні табло, інтерактивні програми; програми підтримки місцевих громад та еко-тури: залучення туристів до збереження довкілля, купівля локальних продуктів та сувенірів.

Таблиця 2 наглядно демонструє конкретні «зелені» технології, їхні економічні та екологічні ефекти [26, 27], а також приклади впровадження у світі.

Приклади успішних «зелених» інновацій у сфері гостинності у світі: Сінгапур: Marina Bay Sands (<http://www.marinabaysands.com/>) – один із найбільших готельних комплексів впровадив сонячні панелі, системи рециркуляції води, автоматичне регулювання освітлення та кондиціонування, що дозволило знизити енергоспоживання на 20%. Швеція: Treehotel – готель розташований у лісовій зоні, застосовує еко-матеріали, енергоефективні технології та автономні системи енергопостачання, водозберігаючі інновації та мінімізацію відходів. Іспанія: H10 Suites Lanzarote Gardens (<https://www.h10hotels.com/>) – готель впровадив комплекс енергозберігаючих заходів, використання сонячних панелей, LED-освітлення та автоматизацію систем управління ресурсами. США: Proximity Hotel, North Carolina (<https://www.proximityhotel.com>) – перший сертифікований LEED Platinum готель, що інтегрував сонячні панелі, теплові насоси, локальні матеріали та системи управління ресурсами, демонструючи ефективність «зелених» інновацій у гостинності.

Переваги впровадження «зелених» інновацій:

- Екологічні вигоди: скорочення викидів парникових газів; ефективне використання води та енергії; мінімізація відходів та забруднення довкілля.

- Економічні переваги: зниження витрат на енергію, воду та управління відходами; підвищення інвестиційної привабливості об'єктів; довгострокова окупність інноваційних технологій.

- Соціальні та маркетингові переваги: формування позитивного іміджу серед екологічно свідомих туристів; підвищення мотивації та

компетентності персоналу; залучення туристів до екологічно відповідальних практик.

- Конкурентні переваги: відрізняє об'єкт на ринку гостинності; відкриває доступ до міжнародних сертифікацій та програм сталого туризму; сприяє розвитку регіонального еко-туризму.

Таблиця 2. «Зелені» технології у сфері гостинності, їхні економічні та екологічні ефекти

Технологія / Інновація	Екологічний ефект	Економічний ефект	Приклади впровадження
Сонячні панелі (PV)	Зменшення викидів CO ₂ , зменшення споживання електроенергії з невідновлюваних джерел	Зниження витрат на електроенергію до 30–50%	Marina Bay Sands (Сінгапур), H10 Suites Lanzarote Gardens (Іспанія)
Геотермальні теплові насоси	Мінімізація споживання традиційного палива для опалення/охолодження	Зниження витрат на опалення/кондицію вання до 40%	Treehotel (Швеція)
LED-освітлення та «розумні» системи управління	Зменшення електроспоживання та викидів	До 20% економії на освітленні	Proximity Hotel (США)
Рециркуляція сірої води	Зменшення витрат на воду, зниження навантаження на системи водопостачання	Зменшення витрат на водопостачання до 25–35%	Ecoboutique Hotels (Іспанія, Мексика)
Сортування та компостування відходів	Зменшення обсягів сміття, виробництво біогазу та добрив	Зниження витрат на утилізацію відходів, можливість отримання додаткових ресурсів	Proximity Hotel (США), Treehotel (Швеція)
Зелені дахи та вертикальні сади	Покращення мікроклімату, зменшення ефекту «міського теплового острова»	Зниження витрат на кондиціонування	Marina Bay Sands (Сінгапур), Treehotel (Швеція)
Еко-матеріали у будівництві	Зменшення використання невідновлюваних ресурсів, зниження токсичності	Довговічність, менше витрат на ремонт та обслуговування	Treehotel (Швеція), Ecolodge (Коста-Рика)
Цифрові платформи управління ресурсами	Моніторинг енергоспоживання, водоспоживання та відходів	Оптимізація витрат і підвищення ефективності	Proximity Hotel (США), H10 Suites Lanzarote Gardens (Іспанія)

Освітні програми для гостей	Підвищення екологічної свідомості	Підвищення задоволеності та лояльності туристів	Treehotel (Швеція), Escoboutique Hotels (Іспанія)
Сертифікація LEED, Green Key, Green Globe	Підтвердження екологічності та сталості	Збільшення кількості гостей, доступ до міжнародних ринків	Proximity Hotel (США), H10 Suites Lanzarote Gardens (Іспанія), Green Key Hotels (Європа)

Джерело: Where hospitality meets sustainability: leading solutions for the industry. [https://www.greenhospitality.io/?gad_source=1&gad_campaignid=How Green Hotels transforms every stay night into sustainable actions?](https://www.greenhospitality.io/?gad_source=1&gad_campaignid=How+Green+Hotels+transforms+every+stay+night+into+sustainable+actions?) June 14, 2025. <https://horecfex.com/en/green-hotels-transform-every-stay-into-sustainable-action/#:~:text>

Але, існують деякі виклики та обмеження щодо впровадження «зелених» інновацій: високі початкові інвестиції для впровадження технологій та реконструкції об'єктів; необхідність кваліфікованого персоналу для експлуатації та обслуговування систем; обмеження ресурсів та кліматичні особливості (наприклад, недостатнє сонячне або вітрове випромінювання); потреба у систематичному моніторингу та підтримці для забезпечення ефективності інновацій. Рекомендації щодо впровадження «зелених» інновацій: комплексний аудит ресурсів та інфраструктури перед інвестиціями; пілотне впровадження технологій на частині об'єктів для оцінки ефективності; поєднання енергозберігаючих, водозберігаючих та екологічних рішень у єдину систему управління; навчання персоналу та залучення гостей до екологічних практик; сертифікація об'єктів за міжнародними стандартами (LEED, Green Key, Green Globe) для підтвердження ефективності заходів та підвищення престижу. «Зелені» інновації у сфері гостинності є ключовим інструментом досягнення сталого розвитку туристичних підприємств. Вони дозволяють ефективно використовувати ресурси, мінімізувати негативний вплив на довкілля, зменшувати витрати та підвищувати конкурентоспроможність. Впровадження інноваційних технологій у поєднанні із сертифікацією та освітніми програмами створює комплексний підхід до сталого розвитку, формуючи модель сучасного екологічно відповідального туристичного підприємства.

Цифровізація як інструмент підвищення ефективності ресурсокористування

Сучасна туристична індустрія перебуває під впливом двох глобальних тенденцій: зростаючої потреби у сталому розвитку та швидкої цифрової трансформації. Цифровізація стає ключовим інструментом підвищення ефективності ресурсокористування у сфері туризму, оскільки дозволяє підприємствам оптимізувати енергоспоживання, водопостачання, управління відходами, а також забезпечує прозорість та контроль за витратами. Впровадження цифрових технологій у готельному та туристичному бізнесі

включає як інтелектуальні системи управління ресурсами, так і аналітичні інструменти для прийняття обґрунтованих рішень щодо збереження ресурсів. Цифровізація дозволяє інтегрувати екологічні та економічні аспекти діяльності, сприяючи сталому розвитку галузі.

Основні цифрові інструменти для ефективного ресурсокористування:

– Системи моніторингу та управління енергоспоживанням (Energy Management Systems, EMS): дозволяють в режимі реального часу відстежувати споживання електроенергії, газу та тепла; оптимізують роботу кліматичних систем, освітлення та побутового обладнання; можуть інтегруватися з відновлюваними джерелами енергії для максимального використання альтернативної електрики.

– Системи управління водними ресурсами: контролюють споживання води у всіх підрозділах об'єкта: готельні номери, басейни, пральні, кухні; виявляють протікання та нераціональне використання води; інтегруються з технологіями рециркуляції сірої води для повторного використання.

– Інтелектуальні системи управління відходами: використовують датчики та IoT-пристрої для контролю обсягів сміття; сприяють автоматизованому сортуванню та переробці; дозволяють прогнозувати потребу у контейнерах та планувати вивезення, що знижує витрати.

- Платформи аналізу та прогнозування: збирають дані про енергоспоживання, воду, відходи та ресурсні потоки; використовують штучний інтелект та алгоритми машинного навчання для прогнозування пікових навантажень; допомагають планувати закупівлі, управління персоналом та обслуговування систем з мінімізацією витрат ресурсів.

- Мобільні додатки та платформи для гостей: дозволяють туристам контролювати використання ресурсів у номері (освітлення, кондиціонування, нагрів води); інформують про екологічні практики готелю та заохочують свідоме споживання ресурсів; сприяють підвищенню задоволеності та залученості гостей у програму сталого розвитку.

– Системи «розумного будинку» та IoT-пристрої: інтелектуальні датчики освітлення, руху, температури та вологості автоматично регулюють умови в приміщеннях; оптимізують роботу енергетичних та водопостачальних систем; підвищують ефективність використання ресурсів без зниження комфорту гостей.

До переваг цифровізації ресурсокористування можна віднести наступні чинники, по-перше, це економія ресурсів та витрат: зменшення споживання електроенергії та води на 15–40%; зниження витрат на утилізацію відходів та обслуговування систем. По-друге, підвищення ефективності управління: автоматизація контролю ресурсів та енергоспоживання; зниження людського фактора та помилок при обліку ресурсів; можливість оперативного реагування на надзвичайні ситуації (протікання, перевитрати). По-третє, прозорість та аналітика: надання даних для сертифікації та оцінки сталості об'єкта; збір статистики для оцінки ефективності впроваджених технологій; полегшення підготовки звітності для керівництва та інвесторів. По-четверте, екологічна

відповідальність та імідж сприяє: підтримці іміджу екологічно свідомого підприємства; залученню клієнтів, що цінують сталий розвиток; підтримки корпоративної соціальної відповідальності (CSR). Наведемо приклади застосування цифрових технологій у туризмі: Proximity Hotel, США — інтегрована EMS-система дозволяє оптимізувати освітлення, кондиціонування та опалення, що зменшило енергоспоживання на 30%; Marina Bay Sands, Сінгапур — система Smart Building контролює температурні режими, споживання води та енергетичні потоки у всьому комплексі; Treehotel, Швеція — цифрові датчики контролюють споживання води та електроенергії у всіх номерах та спільних приміщеннях, забезпечуючи мінімізацію відходів ресурсів; Accor Hotels, Європа — мобільний додаток для гостей дозволяє керувати енергоспоживанням номеру та мотивує до свідомого споживання.

Виклики та обмеження: високі початкові інвестиції у цифрові системи та датчики; необхідність навчання персоналу для ефективного використання систем; проблеми сумісності та інтеграції старих об'єктів із новими цифровими платформами; кібербезпека та захист даних гостей — важливий аспект при використанні IoT-пристроїв та мобільних додатків. З урахуванням переваг і існуючих викликів та обмежень можна запропонувати рекомендації щодо впровадження цифрових інструментів для ефективного ресурсокористування: провести аудит ресурсокористування перед інтеграцією цифрових технологій; розпочати впровадження з пілотних зон для оцінки ефективності; використовувати інтегровані системи EMS та IoT для комплексного контролю ресурсів; навчати персонал та інформувати гостей про можливості цифрового контролю; постійно оновлювати програмне забезпечення та інтегрувати нові аналітичні модулі для оптимізації.

Цифровізація є потужним інструментом підвищення ефективності ресурсокористування у туристичних та готельних підприємствах. Впровадження інтелектуальних систем управління енергоспоживанням, водою, відходами та інтегрованих платформ аналізу дозволяє значно знизити витрати, підвищити екологічну відповідальність, забезпечити конкурентоспроможність та стійкість підприємств. Комплексний підхід до цифровізації у поєднанні із «зеленими» інноваціями та сертифікацією формує сучасну модель сталого туристичного підприємства.

Практична реалізація екологічних принципів сталого туризму

Екотуризм у сучасному світі розглядається як інноваційна форма сталого туризму, що поєднує економічну вигоду з екологічною відповідальністю та соціальною користю. Його головна мета — створення умов для збереження природних і культурних ресурсів через відповідальне використання рекреаційного потенціалу територій. Міжнародний досвід свідчить, що ефективна реалізація екотуристичних стратегій можлива лише за умови інституціональної підтримки на рівні держави, наявності чіткої нормативної бази, системи сертифікації та екологічного менеджменту, а також участі місцевих громад у прийнятті управлінських

рішень. У цьому контексті провідні країни світу демонструють різні моделі екотуризму – від державних національних програм до локальних ініціатив і партнерських проєктів між урядами, бізнесом та громадськими організаціями.

Європейська модель екотуристичних стратегій – Європейський Союз вважається світовим лідером у впровадженні політик сталого та екологічного туризму. Основу європейської моделі становлять три ключові напрями:

1. Нормативне регулювання та стратегічне планування. ЄС реалізує політику сталого туризму в межах Європейського зеленого курсу (European Green Deal), метою якого є досягнення кліматичної нейтральності до 2050 року. Документ «Agenda for a sustainable and competitive European tourism» визначає необхідність поєднання економічної привабливості туризму з екологічними пріоритетами. Впроваджуються національні стратегії екотуризму у Франції, Німеччині, Італії, Іспанії та Австрії, які передбачають розвиток “зелених” маршрутів, екопарків і систем природного моніторингу.

2. Сертифікація та екологічне маркування. У ЄС діють системи EU Ecolabel і Green Key, які засвідчують екологічну відповідність туристичних підприємств – готелів, кемпінгів, ресторанів, туристичних агентств. Отримання таких сертифікатів є важливою умовою конкурентоспроможності на європейському туристичному ринку.

3. Підтримка місцевих екотуристичних ініціатив. ЄС реалізує програми LIFE+ та LEADER, які фінансують розвиток місцевого екотуризму, зокрема в сільських та гірських районах. У рамках цих програм громади створюють екомаршрути, велосипедні та пішохідні стежки, екологі, а прибуток спрямовується на охорону природи. Прикладом ефективного впровадження є Австрія, де понад 60% готелів мають екосертифікати, а туризм базується на принципі «Green Hospitality». У Німеччині діє національна програма «TourCert», що поєднує систему сертифікації з навчанням персоналу принципам сталого розвитку.

Скандинавський досвід сталого туризму: скандинавські країни – Швеція, Норвегія, Фінляндія, Данія – є еталоном практичної реалізації екологічних принципів у туризмі. Основні характеристики скандинавського підходу:

- Законодавче підґрунтя: екотуризм є складовою державних програм охорони природи. У Фінляндії діє «Стратегія сталого туризму до 2030 року», що передбачає 100% використання відновлюваної енергії у туристичному секторі.
- Екомаркування Nordic Swan: туристичні підприємства зобов'язані дотримуватися стандартів енергозбереження, водоощадності, управління відходами та соціальної відповідальності.
- Принцип “Right of Access” (право на природу): громадяни мають право вільно пересуватися природними територіями, але з суворим дотриманням екологічних норм – не шкодити рослинності, не залишати сміття, не турбувати дикі види тварин.

- Освітній компонент: державні туристичні установи організовують кампанії екопросвіти, інтегруючи природничі знання у маршрути. Результатом цієї політики є висока якість природного середовища, розвиток екотуристичних зон і стійкий баланс між рекреацією та збереженням екосистем.

Досвід Канади та США: у Канаді та США екотуризм є важливою складовою політики національних парків. Тут реалізуються стратегії, що поєднують економічну вигоду від туризму з фінансуванням охорони природи. Основні елементи північноамериканської моделі: система екологічного планування: визначення допустимих рекреаційних навантажень для кожного парку (наприклад, Йосеміті, Єллоустоун, Банф); квотування та дозвільна система: відвідування парків здійснюється за попередньою реєстрацією, що запобігає перенасиченню територій туристами; освітня та виховна функція: у національних парках діють «Visitor Centers» – екоосвітні центри, які проводять лекції та практичні заняття для відвідувачів; фінансування природоохоронних заходів за рахунок туризму: частина прибутку від турів, кемпінгів і квитків спрямовується на підтримку охорони флори й фауни. Таким чином, модель США та Канади демонструє, як економічний інтерес туристичного бізнесу може ефективно поєднуватися з екологічними завданнями через продумане управління природними територіями.

Азійські інновації у сфері екотуризму: Азійські країни демонструють унікальне поєднання традиційного ставлення до природи та сучасних технологій управління туризмом. У Японії концепція *Satoyama* передбачає гармонійне співіснування людини і природи. Туризм розвивається на основі принципу «нульового впливу» (*Zero Impact*), із застосуванням екотехнологій, відновлюваних джерел енергії та переробки відходів. Південна Корея активно впроваджує «Smart Tourism» – систему цифрового управління туристичними потоками через мобільні додатки, що регулюють відвідування екологічно чутливих зон. Країни Таїланд і В'єтнам реалізують державні програми підтримки місцевих екотуристичних підприємств, зокрема «Community Based Tourism», коли громади отримують частину прибутку від туризму, водночас забезпечуючи охорону природних ландшафтів.

У реалізації екотуристичних стратегій важливу роль відіграють міжнародні інституції, міжнародні організації та глобальні програми сталого туризму. Всесвітня туристична організація (UNWTO) координує політику сталого туризму, проводить моніторинг екологічних показників у країнах-членах. Програма ООН з навколишнього середовища (UNEP) підтримує впровадження «зелених стандартів» у готельному бізнесі та транспорті. Міжнародний союз охорони природи (IUCN) визначає екологічні вимоги для розвитку туризму в природоохоронних територіях. Програма «Blue Flag» сертифікація пляжів, портів і туристичних зон, що відповідають високим екологічним стандартам якості води, безпеки та управління відходами. Global Sustainable Tourism Council (GSTC) –

розробляє міжнародні критерії сталого туризму, що включають економічну, соціальну й екологічну складові. Міжнародний досвід доводить, що успішне впровадження екотуристичних стратегій базується на системному підході, який охоплює: наявність чіткої державної політики сталого туризму; нормативно-правове забезпечення природоохоронної діяльності; економічні стимули для екологічно відповідального бізнесу; інформаційно-освітні програми для туристів і працівників галузі; участь місцевих громад у прийнятті рішень і розподілі прибутку. Застосування цих практик в Україні може сприяти створенню конкурентоспроможної моделі національного екотуризму, заснованої на європейських принципах, скандинавських стандартах екоменеджменту та північноамериканських механізмах фінансування природоохоронних заходів.

Законодавче регулювання екологічних принципів сталого розвитку туризму в Україні

Екологічні принципи сталого розвитку туризму в Україні регулюються комплексом законодавчих та нормативно-правових актів, які охоплюють як загальні засади охорони навколишнього середовища, так і специфічні вимоги до туристичної сфери. Мета такого регулювання – забезпечити збалансоване використання природних ресурсів, збереження біорізноманіття та культурної спадщини, а також інтеграцію принципів сталого розвитку у туристичну діяльність. Конституція України (від 28.06.1996 № 254к/96-ВР) [28] встановлює основні права та обов'язки громадян і держави щодо охорони навколишнього середовища: стаття 50 гарантує право кожного на доступ до інформації про стан навколишнього середовища; стаття 66 визначає обов'язок держави охороняти природу і природні ресурси; стаття 68 закріплює право громадян на участь у природоохоронних заходах. Ці положення створюють правову основу для інтеграції екологічних принципів у туристичну діяльність, забезпечуючи баланс між економічним розвитком та охороною довкілля.

До законодавчо–нормативних актів у сфері охорони довкілля відносяться: Закон України «Про охорону навколишнього природного середовища» (Відомості Верховної Ради України (ВВР), 1991, № 41, ст.546) [29], який визначає основні принципи охорони природи та використання природних ресурсів; передбачає заходи щодо регулювання антропогенного навантаження, що включає й туристичну діяльність. Закон України «Про природно-заповідний фонд України» (Відомості Верховної Ради України (ВВР), 1992, № 34, ст.502) [30] регулює діяльність у національних парках, заповідниках, заказниках, що є ключовими територіями для екотуризму. Встановлює обмеження та правила туристичного відвідування охоронюваних територій. Закон України «Про оцінку впливу на довкілля» (2017) [31] визначає процедури оцінки потенційного впливу туристичних об'єктів та проєктів на навколишнє середовище; встановлює обов'язковий етап для будівництва туристичних комплексів, еко-готелів та інфраструктури у природоохоронних зонах. Водний Кодекс України (Відомості Верховної Ради України (ВВР), 1995,

№ 24, ст.189) [32] регулює використання водних об'єктів для туристичних та рекреаційних цілей; забезпечує охорону водойм від забруднення та перевантаження туристичним навантаженням.

Законодавство у сфері туризму: Закон України «Про туризм» (Відомості Верховної Ради України (ВВР), 1995, № 31, ст.241) [33] встановлює загальні правила туристичної діяльності та обов'язкові стандарти безпеки і охорони довкілля; передбачає розробку маршрутів та туристичних об'єктів з урахуванням екологічних вимог. Національна стратегія розвитку туризму до 2026 року визначає пріоритети сталого розвитку, інтеграції екологічних принципів та розвитку еко-туризму; передбачає впровадження стандартів сталого туризму та сертифікації об'єктів. Нормативно-правові акти, що регулюють екологічну безпеку туристичних об'єктів: державні будівельні норми (ДБН) у сфері рекреаційної інфраструктури регламентують будівництво туристичних комплексів з мінімальним впливом на природу та включають вимоги до водопостачання, каналізації, енергозбереження та відходів. Державні санітарні правила та норми (ДсанПіН) встановлюють гігієнічні стандарти для туристичних закладів, які враховують екологічні аспекти (очистка стічних вод, контроль відходів). Постанови Кабінету Міністрів щодо охорони заповідних територій та регіональних природних парків визначають правила пересування туристів, обмеження на активність у чутливих екосистемах та забезпечують екологічний контроль туристичних маршрутів та інфраструктури.

Міжнародні та інтеграційні документи: Конвенція про біорізноманіття (1992, Ріо-де-Жанейро) – Україна є учасницею, інтегрує принципи збереження природи у туристичну політику. Цілі сталого розвитку ООН (SDGs, 2015) – особливо цілі 11 (сталі міста та громади), 12 (відповідальне споживання та виробництво), 14 (охорона водних ресурсів) та 15 (збереження екосистем). Міжнародні стандарти сертифікації туристичних об'єктів – Blue Flag, Green Key, ISO 14001, що рекомендуються для українських еко-готелів та рекреаційних зон. Екологічні принципи сталого розвитку туризму в Україні регулюються комплексом нормативних актів, які можна умовно поділити на: Конституційні засади охорони природи; закони та підзаконні акти у сфері охорони довкілля; законодавство у сфері туризму та рекреації; нормативні документи щодо будівництва та санітарних вимог; міжнародні стандарти та інтеграційні програми. Таке законодавче поле забезпечує системну інтеграцію екологічних принципів у туристичну діяльність, дозволяє планувати маршрути, будувати інфраструктуру та контролювати туристичне навантаження з мінімальним впливом на довкілля, а також сприяє інтеграції України у глобальні екотуристичні мережі.

Український контекст: державна політика у сфері сталого туризму

Державна політика у сфері сталого туризму в Україні спрямована на поєднання економічного розвитку туристичної галузі з охороною

природного та культурного середовища. Вона передбачає комплекс заходів, які забезпечують: раціональне використання природних ресурсів, збереження екосистем, підвищення якості туристичних послуг, розвиток місцевих громад та культурної спадщини. У сучасних умовах стратегія сталого туризму в Україні є важливим елементом національної економічної політики, оскільки туризм здатний формувати значний економічний потенціал, створювати робочі місця та сприяти міжнародній інтеграції країни. В Україні для регулювання сталого туризму використовується система законів, підзаконних актів та стратегічних програм. До підзаконних актів та державних програм відносяться: Національна Стратегія розвитку туризму та курортів на період до 2026 року (Розпорядження КМУ від 16 березня 2017 р. № 168-р) [34] – включає напрямки екотуризму, зелених маршрутів, підтримки національних парків і культурних об'єктів. Державна цільова програма розвитку зеленого туризму в Україні – спрямована на розвиток сільського та екотуризму, стимулювання малих підприємств і місцевих ініціатив. Порядок сертифікації туристичних об'єктів та екомаркування (впроваджується експериментально) – забезпечує відповідність підприємств екологічним стандартам. Місцеві регуляторні ініціативи: обласні програми розвитку туризму у Карпатах, Поділлі, на Прикарпатті та в Чорноморському регіоні. Встановлення зон рекреаційної та природоохоронної діяльності, лімітів на відвідування національних парків та заповідників. Основні стратегічні напрямки державної політики: 1. Розвиток екотуризму та зелених маршрутів: створення мережі національних природних парків, ландшафтних заказників і заповідників для залучення туристів; впровадження екологічних туристичних маршрутів з інформаційними стендами, екоосвітніми програмами та маршрутами низького впливу. 2. Підтримка сільського та громадського туризму: стимулювання розвитку сільських садиб, екохостелів, агротуристичних комплексів; залучення місцевих громад до управління туристичними ресурсами та отримання економічної вигоди. 3. Інтеграція екологічних стандартів у туристичну діяльність: запровадження екологічного маркування туристичних об'єктів та програм сертифікації; встановлення нормативів туристичного навантаження на природоохоронні території та культурні об'єкти. 4. Екологічна освіта та просвітництво туристів і персоналу: організація тренінгів, семінарів та інформаційних кампаній; введення інформаційних платформ і додатків для туристів із правилами поведінки у природних зонах. 5. Цифровізація та моніторинг: використання ГІС-технологій та дронів для контролю стану ландшафтів і ресурсів; створення баз даних про туристичні потоки, стан заповідників і національних парків.

В табл. 3 наведена-систематизація кращих практик екотуризму в регіонах України, яка систематизує об'єкти, ініціативи та результати.

Таблиця 3. Практики екотуризму в регіонах України

Регіон	Основні об'єкти	Екотуристичні ініціативи	Результати та ефект
Карпати	Сколівські Бескиди, Карпатський біосферний заповідник, Синеvir	Зонування територій (суворо охоронювані, рекреаційні, туристично-доступні); пішохідні та велосипедні маршрути; агросадиби з альтернативною енергетикою; проекти «Green Carpathians», GIZ	Збереження флори і фауни; контроль туристичного навантаження; підвищення доходів місцевих громад; популяризація екологічної культури
Поділля	Національний природний парк «Подільські Товтри», річка Дністер	Пішохідні та водні маршрути; екологічне навчання гідів; зелені садиби та екохостели	Мінімізація впливу на екосистеми; підтримка локальної економіки; збереження культурної спадщини
Прикарпаття	Гуцульський та Верховинський нацпарки	Обмеження доступу до чутливих зон; оздоровчі маршрути; екоферми з відновлюваною енергією	Збереження гірських екосистем; розвиток сільського туризму; популяризація екологічних практик
Чорноморський регіон	Асканія-Нова, Тузлівські лимани, Білобережжя Святослава	Сертифікація пляжів «Blue Flag»; контроль водного туризму; екоцентри для туристів	Підвищення екологічної безпеки; розвиток відповідального морського туризму; залучення громад до управління ресурсами
Дніпровський регіон	Канівський природний заповідник, річка Дніпро	Водні маршрути з контролем навантаження; екоосвітні програми	Збереження водних та прибережних екосистем; формування екологічної свідомості туристів
Поліський регіон	Чорнобильський радіаційно-екологічний заповідник	Спеціалізовані гідів; обмежені маршрути; науково-освітні програми	Мінімізація антропогенного впливу; розвиток наукового та освітнього туризму; популяризація збереження екосистем

Карпати вважаються центром екотуризму України, адже регіон відзначається високим біорізноманіттям, наявністю унікальних ландшафтів і культурних об'єктів. Основні практики:

- Національні природні парки та заповідники: Сколівські Бескиди, Карпатський біосферний заповідник, Синевирський парк — впроваджують систему зонування: суворо охоронювані, рекреаційні та туристично-доступні зони; використання GPS-моніторингу для контролю туристичних потоків та запобігання перенавантаженню екосистем.

- Екотуристичні маршрути: створення пішохідних та велосипедних маршрутів з інформаційними стендами про флору, фауну та культурну спадщину; впровадження принципу «Leave No Trace» («Не залишай слідів») для всіх туристів.

- Розвиток сільського та зеленого туризму: агросадиби Карпат пропонують туристам екологічне житло з використанням альтернативних джерел енергії, локальних продуктів та мінімального впливу на навколишнє середовище. Приклади: Садиби «Карпатська Фазенда» та «ЕкоЛад», де застосовуються методи сортування відходів та використання сонячної енергії.

- Співпраця з міжнародними програмами: проекти «Green Carpathians» та програми GIZ (Німецьке товариство міжнародного співробітництва) – підтримка локальних громад та навчання персоналу екостандартам.

Поділля відоме своїми історичними містами, каньйонами та річковими ландшафтами. Тут екотуризм поєднується із збереженням культурної спадщини, а саме:

Природоохоронні та рекреаційні території: Національний природний парк «Подільські Товтри» – веде облік туристичних потоків, розробляє екологічні маршрути та обмежує відвідування у чутливих зонах

- Впровадження програми навчання гідів та працівників парку щодо сталого туризму.

- Екотуристичні маршрути та водні види рекреації: Каякінг по річці Дністер із контролем за впливом на флору та фауну; пішохідні та велосипедні маршрути, що включають відвідування історико-культурних пам'яток, водночас дотримуючись принципів мінімального втручання.

- Місцеві ініціативи зеленого туризму: садиби та гостинні двори з акцентом на локальні продукти та екологічні практики (наприклад, ЕкоХата «Дністровський каньйон»); освітні програми для туристів щодо збереження природних ресурсів та місцевої культури.

Прикарпаття поєднує гірські ландшафти, лікувальні ресурси та багаті природні території. Тут екотуризм інтегрується із рекреаційною діяльністю та охороною біорізноманіття:

- Національні та регіональні парки: Гуцульський національний природний парк, Верховинський природний парк – впроваджують систему обмеженого доступу до чутливих територій та контроль туристичних потоків.

- Екотуристичні маршрути та програми оздоровлення: поєднання походів із оздоровленням у гірських курортах (лікувальні джерела, санаторії) із мінімальним впливом на довкілля; використання

інформаційних центрів із роз'ясненням правил поведінки у природних зонах.

- Зелений та сільський туризм: підтримка агросадиб та екоферм, що використовують відновлювані джерела енергії та сортування відходів (ЕкоФерма «Карпатський Ранок»). Туристи залучаються до культурно-природничих програм, що популяризують збереження традицій та екосистем.

Чорноморське узбережжя та дельта Дунаю – це унікальні території з високим рекреаційним потенціалом. Тут екотуризм реалізується через поєднання морських ресурсів, заповідних зон та культурної спадщини:

- Національні парки та природоохоронні території: Асканія-Нова, Тузлівські лимани, Білобережжя Святослава – ведуть контроль туристичного навантаження та охорону біорізноманіття. Запроваджено екологічні маршрути для спостереження за птахами та дикою природою.

- Екотуристичні ініціативи: «Blue Flag» – сертифікація пляжів, що відповідають міжнародним стандартам якості води та безпечного рекреаційного середовища. Організація водних турів із обмеженням кількості човнів та контрольованим доступом до чутливих зон.

- Розвиток локальних громад: місцеві екоцентри та інформаційні пункти навчають туристів принципам сталого користування ресурсами; громади отримують прибуток від екотуризму та використовують його для розвитку інфраструктури і збереження природних територій.

Дніпровський регіон характеризується: розвитком водного туризму на річці Дніпро із контролем за екологічними нормами та підтримкою природоохоронних зон, таких як Канівський природний заповідник, через регламентацію туристичного навантаження. Поліський регіон впроваджує: активний розвиток екотуризму у зоні Чорнобильського радіаційно-екологічного заповідника; використання спеціалізованих гідів та обмежених маршрутів для мінімізації впливу на природу; освітні програми для туристів та науковців із фокусом на збереження унікальних екосистем. Аналіз практик регіонів України дозволяє виділити кілька ключових принципів успішного екотуризму:

1. Зонування територій і контроль туристичного навантаження – ефективно у Карпатах, Поділлі та Чорноморському регіоні.

2. Інтеграція сільського та зеленого туризму – сприяє економічній підтримці місцевих громад і одночасно збереженню ресурсів.

3. Впровадження екологічних стандартів і сертифікацій – «Blue Flag», екологічні маркування готелів і садиб.

4. Освітні та інформаційні програми – формування свідомої поведінки туристів та підвищення екологічної культури.

5. Співпраця з міжнародними програмами – залучення фінансування, консультацій та методичної підтримки (проекти GIZ, UNDP, UNEP).

Таким чином, досвід українських регіонів демонструє, що екотуризм може стати драйвером сталого розвитку, якщо поєднувати економічну

ефективність із збереженням природних і культурних ресурсів та активною участю місцевих громад.

Основні проблеми, що стоять на шляху реалізації сталого туризму в Україні: недостатнє фінансування національних парків і природоохоронних територій; обмежена кількість сертифікованих «зелених» об'єктів і недостатня мотивація бізнесу до впровадження екостандартів; потреба у підготовці кваліфікованого персоналу та навчанні громад екологічній відповідальності; відсутність єдиної системи збору даних про туристичні потоки та екологічний стан територій. Перспективи розвитку державної політики: активне впровадження екологічного маркування та сертифікації туристичних підприємств; розширення екотуристичних маршрутів та зелених зон у регіонах із високим природним потенціалом; використання цифрових технологій для моніторингу екологічного стану територій; залучення міжнародних грантів та програм (UNWTO, UNEP, Global Sustainable Tourism Council) для фінансування екоініціатив.

Державна політика України у сфері сталого туризму націлена на гармонізацію економічних, соціальних і екологічних інтересів. Вона передбачає розвиток екотуризму, зелених маршрутів, сільського туризму, впровадження стандартів екоменеджменту та екологічного маркування. Реалізація цих заходів забезпечує: збереження природних і культурних ресурсів; підвищення конкурентоспроможності туристичних регіонів; розвиток місцевих громад; формування екологічної свідомості туристів і персоналу. Водночас для досягнення високого рівня ефективності потрібні додаткове фінансування, підготовка кадрів, вдосконалення нормативної бази та активне впровадження міжнародного досвіду. Це дозволить Україні стати сучасним прикладом поєднання туризму і природоохоронної діяльності на засадах сталого розвитку.

Партнерство влади, бізнесу і громади у впровадженні екотуристичних проєктів

Сталий екотуризм у сучасних умовах неможливий без взаємодії трьох ключових суб'єктів: держави, бізнесу та місцевих громад. Таке партнерство дозволяє поєднувати економічні, соціальні та екологічні інтереси у туристичних регіонах. Держава забезпечує нормативно-правове поле, фінансування інфраструктури та контроль за дотриманням екологічних стандартів. Бізнес реалізує туристичні проєкти, впроваджує інновації, сертифікацію та екостандарти, забезпечує послуги туристам і стимулює розвиток регіональної економіки. Громада бере участь у плануванні, управлінні та обслуговуванні туристичних об'єктів, що забезпечує соціальну підтримку і економічну вигоду місцевим жителям. Такий підхід дозволяє: оптимально використовувати природні та культурні ресурси; мінімізувати негативний вплив туризму на довкілля; підвищити економічну ефективність і стійкість туристичних проєктів. Ролі та обов'язки учасників партнерства:

1. Держава: розробка стратегій і програм підтримки екотуризму (національні та регіональні); встановлення екологічних стандартів та норм туристичного навантаження; фінансування інфраструктури — інформаційних центрів, екомаршрутів, туристичних баз; контроль за дотриманням правил охорони природи та безпеки туристів; підтримка програм сертифікації «зелених» готелів, садиб і туристичних об'єктів.

2. Бізнес: реалізація туристичних послуг відповідно до екологічних стандартів; впровадження інноваційних рішень: енергозбереження, відновлювані джерела енергії, сортування та утилізація відходів; підготовка персоналу до роботи за принципами сталого туризму; розробка інтерактивних маршрутів, екскурсій, програм екоосвіти для туристів; співпраця з громадою для розвитку локальної інфраструктури і залучення місцевих ресурсів.

3. Територіальна Громада: участь у плануванні та управлінні туристичними маршрутами та об'єктами; надання послуг: екскурсії, готелі, садиби, ремісничі майстерні; контроль за дотриманням туристами місцевих правил та традицій; просування культурної і природної спадщини через освітні та інтерактивні програми.

Форми взаємодії влади, бізнесу і громади:

- Спільне планування туристичних проєктів. Держава визначає території розвитку туризму, бізнес – інвестує в інфраструктуру, громада — надає локальні послуги. Приклад: створення екомаршрутів у Карпатах, де об'єднано національні парки, приватні садиби та місцеві громади.

- Фінансове партнерство та грантові програми. Держава і міжнародні організації (UNDP, GIZ, UNEP) надають гранти, бізнес доповнює власні інвестиції, громада забезпечує робочу силу та підтримку.

- Навчання і підвищення кваліфікації. Спільні тренінги для гідів, екскурсіводів, персоналу готелів та волонтерів. Впровадження освітніх програм для громади та туристів із фокусом на екологічну культуру.

- Моніторинг та контроль туристичного навантаження. Використання цифрових платформ, дронів та ГІС-технологій для обліку туристів та стану екосистем. Спільна відповідальність: держава встановлює правила, бізнес дотримується стандартів, громада контролює виконання на місцях.

Наведемо приклади успішного партнерства влади, бізнесу і громади у впровадженні екотуристичних проєктів в Україні:

Карпати: Проєкти «Green Carpathians» та «EcoCarpathia» – взаємодія влади (нацпарки, ОДА), бізнесу (гостинні садиби, туристичні компанії) та громад (сільські громади). Результат: створено еко-маршрути, навчальні програми, туристичні бази з енергоефективними рішеннями.

Поділля: Нацпарк «Подільські Товтри» співпрацює з місцевими підприємцями та громадами для розвитку водного і піших турів. Результат: контроль навантаження на екосистему, економічна вигода для громад, підвищення туристичної привабливості. Чорноморський регіон: сертифікація пляжів «Blue Flag» реалізується через кооперацію державних

органів, бізнесу (готелі, пляжні клуби) та громадських організацій. Результат: підвищено екологічний стандарт пляжів, залучено місцеві громади до обслуговування туристів.

Незважаючи на наявність успішних прикладів успішного партнерства влади, бізнесу і громади у впровадженні екотуристичних проєктів в Україні, існують виклики: недостатня координація між учасниками партнерства; нерівномірний доступ до фінансування для малих громад та підприємств; обмежена підготовка персоналу і місцевих мешканців до сталого туризму; необхідність інтеграції цифрових технологій для моніторингу та управління. Перспективи: розширення грантових та державних програм для розвитку екотуризму; створення платформ для постійної комунікації між владою, бізнесом і громадами; інтеграція міжнародного досвіду у сертифікацію туристичних об'єктів та управління ресурсами; розвиток навчальних програм для громади і туристів із формуванням екологічної культури.

Партнерство влади, бізнесу та громади є ключовим механізмом успішного впровадження екотуристичних проєктів. Воно дозволяє: поєднувати економічну ефективність і охорону природних ресурсів; підвищити соціальну залученість місцевих громад; формувати відповідальну поведінку туристів; забезпечити стале функціонування туристичних регіонів. Ефективне партнерство ґрунтується на розподілі ролей, спільному плануванні, взаємній відповідальності та постійному моніторингу результатів, що робить його основою сталого розвитку туризму.

Перспективи інтеграції України у глобальні екотуристичні мережі

Інтеграція у глобальні екотуристичні мережі означає входження України до світових структур і платформ, які об'єднують країни та регіони за принципами сталого туризму, із застосуванням міжнародних стандартів, сертифікацій і практик. Мета інтеграції: підвищення конкурентоспроможності українського туризму на світовому ринку; залучення іноземних туристів та інвестицій; впровадження кращих міжнародних практик з охорони природи та культурної спадщини; забезпечення сталого розвитку туристичної інфраструктури. Глобальні мережі екотуризму включають: Міжнародні програми сертифікації – Blue Flag (пляжі та прибережні території), Green Key (гостинні об'єкти), EarthCheck, ISO 14001. Міжнародні екотуристичні асоціації – Global Sustainable Tourism Council (GSTC), The International Ecotourism Society (TIES). Регіональні ініціативи – Європейська екологічна мережа Natura 2000, проєкти розвитку екотуризму у Східній Європі.

Україна володіє значним потенціалом для включення у світові екотуристичні мережі завдяки:

а) Природним ресурсам: Карпати, Полісся, Подільські Товтри, Чорноморське узбережжя та дельта Дунаю – унікальні біосфери та ландшафти. Висока біорізноманітність і наявність рідкісних видів флори і фауни.

Б) Культурній та історичній спадщині: замки, фортеці, стародавні міста, сакральні об'єкти. Традиційні ремесла та народні промисли, які можуть стати елементом культурного екотуризму.

В) Розвиненій туристичній інфраструктурі: Національні парки, природоохоронні території, еко-садиби, туристичні маршрути. Позитивний досвід місцевих ініціатив у Карпатах та Поділлі.

Г) Міжнародному досвіді і підтримці: Проєкти UNDP, GIZ, UNEP та інші міжнародні гранти, спрямовані на розвиток екотуризму та збереження ресурсів.

Механізми інтеграції України у глобальні мережі:

1. Впровадження міжнародних стандартів сертифікації: сертифікація пляжів та туристичних об'єктів за програмами Blue Flag, Green Key; впровадження систем менеджменту екологічної безпеки (ISO 14001, EarthCheck).

2. Розвиток екотуристичних маршрутів за міжнародними практиками: маршрути, що відповідають критеріям мінімального впливу на екосистеми; використання інтерактивних екоцентрів та цифрових платформ для навчання туристів.

3. Співпраця з міжнародними організаціями та асоціаціями: участь у GSTC, TIES та європейських проєктах розвитку екотуризму; обмін досвідом, навчання персоналу та створення міжнародних партнерств.

4. Цифровізація та маркетинг: розробка міжнародних веб-порталів і додатків для промоції українського екотуризму; використання соціальних мереж, відеоконтенту та інтерактивних карт для залучення туристів.

Виклики інтеграції: недостатня нормативно-правова база – відсутність комплексних законодавчих механізмів, що забезпечують стандартизацію та сертифікацію екотуристичних об'єктів; обмежена екологічна свідомість туристів та бізнесу – необхідність підвищення екологічної культури і впровадження еко-стандартів у малому бізнесі; низький рівень інфраструктурної готовності – деякі регіони потребують модернізації туристичних маршрутів, санітарної та інформаційної інфраструктури; фінансові обмеження – необхідність залучення інвестицій для модернізації туристичних об'єктів та сертифікації. Перспективи розвитку: підвищення конкурентоспроможності українського туризму надасть можливість залучення туристів із Європи, Азії та Північної Америки завдяки відповідності міжнародним стандартам; залучення міжнародних інвестицій – грантові програми, партнерство з міжнародними інституціями та розвиток «зеленого» бізнесу; підвищення якості екологічної освіти за допомогою створення інтерактивних навчальних центрів і цифрових платформ для туристів та місцевих громад; інтеграція у світові екотуристичні маршрути з Карпат, Поділля, Чорноморського узбережжя можуть стати частиною європейських і світових туристичних мереж; розвиток локальної економіки та громади за

допомогою впровадження міжнародних стандартів дозволяє підвищити доходи місцевих громад, залучати нові робочі місця та стимулювати розвиток культурного туризму. Інтеграція України у глобальні екотуристичні мережі – це стратегічна перспектива, яка дозволяє: забезпечити сталий розвиток туристичної галузі; зберегти природні та культурні ресурси; підвищити міжнародний імідж України як екологічно відповідального туристичного напрямку; стимулювати економічний розвиток місцевих громад через інновації та партнерство. Успішна інтеграція потребує комплексного підходу, який поєднує нормативно-правову базу, міжнародні сертифікації, розвиток інфраструктури, підвищення екологічної культури та активну участь держави, бізнесу і місцевих громад.

Висновки. Сталий розвиток туризму є одним із ключових напрямів реалізації загальної концепції сталого розвитку суспільства. Його сутність полягає у забезпеченні гармонійного поєднання економічного зростання, соціального добробуту та охорони навколишнього природного середовища. Туризм може бути як фактором деградації екосистем, так і ефективним механізмом збереження природних і культурних ресурсів – залежно від рівня екологічної відповідальності суб'єктів туристичної діяльності.

Екологічні принципи сталого розвитку туризму формують теоретико-методологічну основу раціонального природокористування. До них належать: пріоритет екологічної безпеки, збереження природних і культурних ландшафтів, дотримання меж екологічної ємності територій, використання відновлюваних ресурсів, мінімізація відходів, формування екологічної свідомості туристів і підприємців.

Аналіз нормативно-правової бази України показав, що екологічні засади сталого розвитку туризму закріплені у низці законодавчих актів – зокрема, у Законах України «Про охорону навколишнього природного середовища», «Про туризм», «Про природно-заповідний фонд України», «Про екологічну мережу України» тощо. Проте існує потреба у вдосконаленні механізмів практичної реалізації екологічних вимог, узгодженні туристичної політики з екологічною та регіональною стратегією розвитку.

Стан екологізації туристичної галузі України залишається недостатнім. Незважаючи на зростання інтересу до екотуризму, спостерігається низький рівень інвестицій у «зелені» технології, відсутність належного контролю за екологічними стандартами, слабкий розвиток системи екологічної освіти і сертифікації туристичних об'єктів.

Раціональне природокористування та ресурсозбереження у туризмі можливі лише за умов переходу до інтегрованого підходу управління, який охоплює екологічне планування територій, впровадження принципів «зеленого офісу» у туристичних підприємствах, мінімізацію вуглецевого сліду та енергоефективне використання ресурсів.

Пропозиції:

- На законодавчому рівні доцільно: розробити державну Концепцію сталого розвитку туризму, яка визначатиме пріоритети екологізації галузі; посилити контроль за дотриманням екологічних норм у діяльності туристичних підприємств і під час використання природних територій.

- Для органів місцевого самоврядування рекомендовано: розробляти регіональні програми розвитку екологічного туризму, що враховують місцеві природні, культурні й соціальні особливості; створювати механізми партнерства між громадою, бізнесом та природоохоронними установами; забезпечити популяризацію екотуристичних маршрутів і залучення місцевого населення до їх обслуговування.

- Для туристичних підприємств необхідно : впроваджувати міжнародні стандарти екологічного менеджменту (ISO 14001, EMAS тощо); розвивати систему «зелених» сертифікатів і маркування екоорієнтованих послуг; використовувати енергозберігаючі технології, матеріали з низьким рівнем забруднення, здійснювати роздільний збір відходів.

- На міжнародному рівні Україна має активніше долучатися до глобальних ініціатив – таких як Програма ООН з навколишнього середовища (UNEP), Всесвітня туристична організація (UNWTO), проекти «Green Destinations» – для обміну досвідом, залучення інвестицій та розвитку екотуристичних брендів.

Узагальнюючи, можна стверджувати, що екологічні принципи сталого розвитку туризму виступають фундаментальною умовою раціонального природокористування, збереження біорізноманіття і підвищення якості життя населення. Їх реалізація можлива лише за умови інтеграції екологічних вимог у всі рівні управління туристичною галуззю – від державного до локального.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. World Conference Tourism and Future Energy – Reducing CO2 Emissions. URL: <https://www.e-unwto.org/doi/pdf/10.18111/9789284419517>

2. World Tourism Organization UNWTO. URL: <http://www2.unwto.org/content/why-tourism>

3. World Trade Report 2022. The Future of Services Trade. URL: https://www.wto.org/english/res_e/booksp_e/01_wtr22_0_e.pdf

4. Destination Criteria. Version 2.0, December 6, 2019. With performance indicators and SDGs. Global Sustainable Tourism Council. URL: <https://www.gstc.org/wp-content/uploads/GSTC-Destination-Criteria-v2.0.pdf>

5. Програма ООН з довкілля (ЮНЕП). URL: <https://hnh.news/3014/programa-oon-z-dovkillya-yunep/#:~:text>

6. Smart Building Systems: A Comprehensive Guide. URL: <https://www.cohesionib.com/info/smart-building-systems#:~:text=Smart%20Building%20Systems:%20A%20Comprehensive,%20security%20and%20energy%20management>.

7. LEED Certification. URL: <https://web.archive.org/web/20161204160700/http://leed.net/>

8. BREEAM. <http://www.breeam.com/>

9. EU Ecolabel Helpdesk. December 2015. Retrieved 2017-02-05. URL: https://ec.europa.eu/environment/ecolabel/documents/logo_guidelines.pdf
10. ISO 50001:2020 Системи енергетичного менеджменту. Вимоги та настанова щодо використання. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=90178
11. Концепія «зеленого» енергетичного переходу України до 2050 року. URL: [https://enfcities.org.ua/upload/files\(1\).pdf](https://enfcities.org.ua/upload/files(1).pdf)
12. UNEP – UN Environment Programme. Climate Technology Progress Report: Unleashing renewable energy for ambitious NDCs. 01 November 2024. URL: https://www.unep.org/resources/report/climate-technology-progress-report-unleashing-renewable-energy-ambitious-ndcs?utm_source
13. Solar Energy and Sustainable Tourism in Europe. July 16, 2024. URL: https://tamesol.com/en/solar-energy-sustainable-tourism/?utm_source
14. Climate and Sustainable Energy. 2025. URL: <https://totalenergies.com/sustainability/climate-and-sustainable-energy>
15. ‘We’re an evolving laboratory’: the island on a quest to be self-sufficient in energy. 11 dec. 2024. URL: https://www.theguardian.com/environment/2024/dec/11/el-hierro-canary-islands-wind-hydro-power-renewable-energy-self-sufficiency-sustainability-aoe?utm_source
16. A New Era in Hospitality as 5,000 Hotels Worldwide Adopt WTTC’s Hotel Sustainability Basics. 20 August 2024. URL: https://wtcc.org/news/5000-hotels-worldwide-adopt-wttcs-hotel-sustainability-basics?utm_source
17. Ukraine approves \$20 billion plan to increase renewable energy production by 2030. Reuters. August 13, 2024. URL: https://www.reuters.com/sustainability/ukraine-approves-20-bln-plan-increase-renewable-energy-production-by-2030-2024-08-13/?utm_source
18. Cook K. Renewable Energy and Tourism: Conflict and Compatibility Between Iceland’s Major Economic Sectors. *Journal for Global Business and Community*, 2024. 15(1). URL: <https://doi.org/10.56020/001c.121428>
https://jgbc.scholasticahq.com/article/121428?utm_source
19. How renewable energy is helping China’s tourism industry go green. May 8, 2025. URL: https://www.reuters.com/sustainability/climate-energy/how-renewable-energy-is-helping-chinas-tourism-industry-go-green-2025-05-08/?utm_source
20. Chhattisgarh Solar Lights Illuminate Dhudmaras Recognized as best-tourism village. Jul 11, 2025. URL: https://timesofindia.indiatimes.com/city/raipur/chhattisgarh-solar-lights-illuminate-dhudmaras-recognized-as-bastars-best-tourism-village/articleshow/122379962.cms?utm_source
21. Renewable energies in the tourism sector. 2023-09-07. URL: https://www.biospheresustainable.com/en/blog/77/renewable-energies-in-the-tourism-sector?utm_source
22. UNEP – Climate Technology Progress Report / resources on renewable energy and climate technology (2024). UNEP – UN Environment Programme. URL: <https://www.unep.org/>
23. Climate Technology Progress Report: Unleashing renewable energy for ambitious NDCs. 01 November 2024. URL: <https://www.unep.org/resources/report/climate-technology-progress-report-unleashing-renewable-energy-ambitious-ndcs>
24. Maria D. Karvounidi, Alexandra P. Alexandropoulou, Andreas E. Towards Sustainable Hospitality: Enhancing Energy Efficiency in Hotels. *RJEMS International Research Journal of Economics and Management Studies*. Published by Eternal Scientific Publications. ISSN: 2583 – 5238 / Volume 3 Issue 6 June 2024. Pg. No: 410-420, Doi: 10.56472/25835238/IRJEMS-V3I6P145 URL:

https://www.researchgate.net/publication/387090225_Towards_Sustainable_Hospitality_Enhancing_Energy_Efficiency_in_Hotels?utm_source

25. Win the energy challenge with ISO 50001. URL: http://www.iso.org/iso/iso_50001_energy.pdf

26. Where hospitality meets sustainability: leading solutions for the industry. URL: https://www.greenhospitality.io/?gad_source=1&gad_campaignid=

27. How Green Hotels transforms every stay night into sustainable actions? June 14, 2025. URL: <https://horecfex.com/en/green-hotels-transform-every-stay-into-sustainable-action/#:~:text=Green%20hotels%20today%20actively%20apply,%2C%20cooling%2C%20or%20toilet%20flushing.>

28. Конституція України. (від 28.06.1996 № 254к/96-ВР). URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/254%D0%BA/96-%D0%B2%D1%80#Text>

29. Закон України «Про охорону навколишнього природного середовища». (Відомості Верховної Ради України (ВВР), 1991, № 41, ст.546). URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1264-12#Text>

30. Закон України «Про природно-заповідний фонд України» (Відомості Верховної Ради України (ВВР), 1992, № 34, ст.502). URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2456-12#Text>

31. Закон України «Про оцінку впливу на довкілля». Відомості Верховної Ради (ВВР), 2017, № 29, ст.315. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2059-19#Text>

32. Водний Кодекс України. Відомості Верховної Ради України, 1995, № 24, ст.189. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/213/95-%D0%B2%D1%80#Text>

33. Закон України «Про туризм». Відомості Верховної Ради України, 1995, № 31, ст. 241. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/324/95-%D0%B2%D1%80#Text>

34. Стратегія розвитку туризму та курортів на період до 2026 року (Розпорядження КМУ від 16 березня 2017 р. № 168-р URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/168-2017-%D1%80#Text>

3.6 ВИКОРИСТАННЯ НАСІННЯ АМАРАНТУ *AMARANTHUS CRUENTUS L.*, ВИРОЩЕНОГО В ГРУЗІЇ

Кікалішвілі Б. Ю., Кахетелідзе М. Б., Явіч П. А.*

Тбіліський Державний Медичний Університет, Грузія
b.kikalishvili@tsmu.edu, m.kakhetelidze@tsmu.edu
iavichp@yahoo.com, p.iavichi@tsmu.edu

У статті наведено дані як щодо фітохімічного дослідження насіння амаранту *Amaranthus cruentus L.*, вирощеного в Грузії, так і щодо технологічної можливості його застосування, що ґрунтується на методі використання у нативній формі. Поряд із цим було використано широкий літературний матеріал, що дало змогу провести порівняльний аналіз, зіставляючи його з уже описаними відповідними даними. Отримані результати свідчать, що цей вид амаранту відноситься до категорії рослин із відносно низьким вмістом олії – до 7%. Це, за умови звичайної втрати олії (у разі використання пресового методу одержання), призводить і до втрати до 50% супутніх біологічно активних речовин, які також відповідають за лікувальний ефект. На думку авторів, єдиним виходом є розробка відповідних технологічних схем із використанням нативного методу переробки сировини. Цей метод було застосовано під час одержання ряду лікарських форм (креми, мазі, маски) для нашкірного застосування.

Ключові слова: Амарант, нативна форма, сировина, олії, біологічна активність

В олії амаранту, що міститься в різних видах насіння цієї рослини, наявна значна кількість біологічно активних речовин. Вона використовується у біотехнології завдяки своїм потужним антиоксидантним, протизапальним та антимикробним властивостям, що пов'язано як із наявністю жирів, так і ряду інших сполук (сквалену, токоферолу, фенольних сполук, каротиноїдів та інших). Використовується в медицині, косметиці, фармацевтичних композиціях та нутрицевтиці при захворюваннях і пошкодженнях шкіри, для прискорення загоєння ран, лікування ряду дерматологічних хвороб. Олія амаранту здатна регулювати стабільність мембран і синергічний потенціал [1]. Метою дослідження було фітохімічне та технологічне вивчення насіння амаранту *Amaranthus cruentus L.*, вирощеного в Грузії, а також розробка методу його використання для одержання ряду лікарських форм для нашкірного застосування. Використовувалося насіння, вирощене на дослідній ділянці в районі Ширакі. Це невеликі зерна діаметром 0,9–1,7 мм, що мають округлу форму з великим зародком, який охоплює перисперм у вигляді кільця та містить крохмаль. Насіння амаранту використовується як цілющий продукт завдяки вмісту в ньому ряду біологічно активних речовин (олії,

амінокислот, каротиноїдів, сквалену та інших). Амарант належить до групи рослин із відносно невисоким вмістом олії в насінні; за літературними даними, її кількість становить 6–8 г/100 г. У процесі роботи здійснено детальний огляд літературних даних з даного питання. Загалом було використано 126 джерел. Для порівняльного аналізу в огляді літератури застосовано 59 джерел (переважно за останні 8 років), які, на думку авторів, є найбільш значущими. Під час проведення експериментальних робіт використовувалися реактиви та матеріали, дозволені до застосування фармакопеями Грузії та США.

Використовувалися такі реактиви та матеріали: (TLC) on silica gel plates (silica gel 60 F254 (20 cm × 20 cm), butanol, acetic acid, chloroform, methanol, n-hexane, naphtha (petroleum ether), diethylether, methyl alcohol, Glycerin 99.5% ACS, Carbopol Ultrez 20, Triethanolamine reagent grade, Sodium hydroxide reagent grade=98, olive oil highly refined, cetearyl alcohol, polysorbate-60, stearic acid, green tea extract, phenoxyethanol, emulsion wax, distilled monoglycerides.

Закупівлі здійснювалися у компаній Merk, Lubrizol, Sigma-Aldrich, Environmental Working Group, Polawax, Remiwx, Food Industry.

Методи дослідження

УФ-спектроскопія, ВРХ, тонкошарова та колонкова хроматографія, титриметрія. Фізико-хімічні та технологічні дослідження одержаних лікарських форм.

Олія насіння амаранту характеризується високою біологічною активністю. Вона, зокрема, містить більше сквалену, ніж інші рослинні олії. Так, за різними джерелами, вміст сквалену становить: в оливковій олії — 150–747 мг/100 г, у кукурудзяній — 10–30 мг/100 г, у соняшниковій — 2–3 мг/100 г, у пальмовій — до 1300 мг/100 г, у соєвій — до 180 мг/100 г. Для порівняння, у жирі печінки акули цей показник сягає 2300–8400 мг/100 г, тоді як в олії з насіння амаранту він становить 6000–8000 мг/100 г. Кількість олії, отриманої з насіння, становить 4–6% їх біомаси, тож амарант належить до групи рослин з низьким вмістом олії. Проте завдяки високому вмісту сквалену та інших біологічно активних речовин його олія належить до найбільш уживаних. Олія амаранту переважно містить олеїнову кислоту (22,8–31,5%), пальмітинову кислоту (21,4–23,8%) та лінолеву кислоту (39,4–49,1%), а також низку незамінних амінокислот (лізин і сірковмісні амінокислоти). Насіння також містить фосфоліпіди, гліколіпіди та стерини як інші ліпідні компоненти.

Із вищезазначених рослин лише олива використовується для отримання комерційного сквалену, попри те, що в амаранті зафіксовано його найвищий вміст [2–4]. Із тваринної сировини переважно застосовують жир печінки акул, у якому вміст сквалену в окремих видів сягає 5000–8400 мг/100 г. При цьому неомілювана фракція становить близько 50–80% маси. Для виробництва 1 тонни сквалену необхідно близько 3000 тварин. Це призводить до зменшення популяції акул і створює загрозу їх

зникнення. Іншим обмеженням використання сквалену, отриманого з акул, є небезпека наявності в печінці органічних забруднювачів [5–8].

Фітосквален, отриманий із рослин методом пресування, має низку переваг – підвищену стабільність, відсутність кольору та запаху, а також відсутність ризику наявності потенційно небезпечних патогенів. У зв'язку з цим косметична та фармацевтична промисловість охоче використовують таку сировину.

Водночас слід враховувати, що застосування на стадії екстракції сировини ряду традиційних органічних розчинників, зокрема нафтового ефіру, гексану та інших аналогічних, є неприйнятним. Екстракти необхідно повністю очищати від них, що призводить до значних втрат основної речовини. Використання таких методів, як екстракція вуглекислим газом або різними флюїдами, пов'язане зі зростанням вартості цільового продукту. Саме тому нині ведуться дослідження з розробки нових технологічних методик [9–11].

Результати

Фітохімічні дослідження

У Грузії протягом багатьох років існують невеликі плантації для вирощування амаранту дев'яти різних видів. У цій статті наведено отримані дані щодо вивчення хімічного складу насіння та листя *Amaranthus cruentus* L. Сировину збирали на експериментальних ділянках у Ширакській зоні Грузії.

Дослідження ліпідів: нейтральні ліпіди виділяли гексаном, полярні ліпіди – сумішшю хлороформу та метанолу (2:1). Фізико-хімічні показники визначали стандартними методами (йодне число, кислотне число, показник заломлення, питома вага).

Жирні кислоти: аналізували методом ВРХ (хроматограф РТГ, рефрактометричний детектор R-401).

Фосфоліпіди: якісний склад визначали методом двовимірної тонкошарової хроматографії на силікагелі (*silica gel 60 F254*, 20 × 20 см, Merck, Darmstadt, Germany). Кількісне визначення проводили спектрофотометричним методом за неорганічним фосфором ($\lambda = 820$ нм).

Каротиноїди та вітамін С: кількість каротиноїдів визначали спектрофотометричним методом після екстракції зразка 96%-м етанолом; максимум поглинання фіксувався при довжині хвилі $\lambda = 450$ нм.

Вміст вітаміну С визначали титриметричним методом — шляхом титрування розчином дихлорфеноліндофенолу (ДСРІР) після екстракції зразка 3%-м розчином метафосфорної кислоти, що запобігає окисненню аскорбінової кислоти.

Амінокислоти: ідентифікацію амінокислот проводили методом тонкошарової хроматографії (ТСХ) на пластинках із силікагелем (*silica gel 60 F254*, 20 × 20 см, Merck, Darmstadt, Germany). Як рухому фазу використовували суміш такого складу: бутанол : оцтова кислота : вода = 6 : 2 : 2 (v/v). Після висушування хроматограм зони амінокислот виявляли

обробкою 1%-м розчином нінгідрину в 96%-му етанолі з подальшим нагріванням пластинок при температурі 105 °С упродовж 5–10 хвилин.

Гліколіпіди: фракції гліколіпідів виділяли методом колонкової хроматографії на матриці з силікагелю (silica gel 60 F254, 20 × 20 см, Merck, Darmstadt, Germany) з елююванням системою хлороформ – метанол – вода (65 : 25 : 4, v/v/v). Отримані елюати додатково досліджували методом тонкошарової хроматографії в тій самій системі. Ідентифікацію гліколіпідів проводили шляхом обробки орциноловим реагентом (Orcinol reagent), який викликає характерне коричневе забарвлення ліпідів, що містять вуглеводи.

У результаті проведеного дослідження отримано такі дані:

Нейтральні ліпіди: вихід – 7%. Основний клас – триацилгліцериди.

Фізико-хімічні показники олії: йодне число – 84,5%; кислотне число – 6,8 мг КОН/г; показник заломлення n_{20D} – 1,463; питома вага – 0,90.

Жирні кислоти: визначено такі: лауринова – 2,3%; міристинова – 4,77%; пальмітинова – 16,7%; стеаринова – 3,7%; олеїнова – 3,7%; лінолева – 14,2%; ліноленова – 5,2%; арахінова – 1,42%.

Фосфоліпіди: ідентифіковано: лізофосфатидилхолін – 4,9%; фосфатидилінозит – 14,4%; фосфатидилхолін – 19,5%; фосфатидилетаноламін – 29,8%; N-ациллізофосфатидилетаноламін – 7,6%; N-ацилфосфатидилетаноламін – 9,7%; неідентифікований фосфоліпід – 12,9%.

Каротиноїди: вміст становив 4,9 мг%.

Аскорбінова кислота: 0,34%.

Сквален: підтверджено методом ТСХ (система гептан–бензол 19:1).

Амінокислоти: ідентифіковано 11 амінокислот, зокрема фенілаланін, лейцин, метіонін, валін, аланін, цистеїн, аспарагін, серин, пролін, аргінін та лізин. Гліколіпіди: виявлено два гліколіпіди (R_f 0,75 і 0,91).

Отримані результати підтверджують, що насіння *Amaranthus cruentus* L., вирощене в Грузії, є цінним джерелом біологічно активних речовин, які характеризуються широким спектром біомедичних властивостей та можуть бути використані в біомедицині, фармації, косметології й для лікарського застосування.

Технологічні дослідження

Існуючі технології отримання біологічно активних речовин із олійних рослин пов'язані зі значними втратами олії та ряду супутніх сполук, а також із високим вмістом біологічно цінних речовин у відходах.

Розглянемо на наступному прикладі. Ядра плодів фундука можуть містити, залежно від географічного розташування та часу збору, у середньому до 60-64% жирних речовин. Олія фундука складається переважно з мононенасичених жирних кислот. Загальний вміст ненасичених жирних кислот досягає 90%. Основний хімічний склад жирних кислот: миристинова, пальмітинова, пальмітолеїнова, стеаринова, олеїнова, вакценова, лінолева, ліноленова, арахідинова та гондосева.

Олеїнова кислота є основною серед ненасичених жирних кислот у всіх досліджених зразках (середнє значення до 77%); у меншій кількості виявлена ліолева (середнє значення до 12%) та вакценова кислота (середнє значення до 1,5–2%). До ненасичених кислот належать пальмітинова (середнє значення до 7,8%) і стеаринова (середнє значення до 3%). Решта присутня у незначних кількостях – менше 1% [12–14].

Олія містить досить високий вміст токоферолів: загальна середня кількість, залежно від сорту, коливається в межах 300-600 мг/кг. При цьому частка α -токоферолу може перевищувати 89% від їх загального вмісту. Кількість сквалену змінюється в межах 199,0-612,3 мг/кг, вміст білка становить 12,6-25,9 г/100 г, вміст вуглеводів – 6,5-24,0 г/100 г, а вітаміну Е – 15-20 мг/100 г [15].

Однак у макусі сировини після екстракції залишається значна кількість олії. Після холодного віджиму, у пресовому варіанті, може міститися до 25-30% олії. З урахуванням зменшення маси, близько 20% олії залишається у відходах.

Макуха містить досить велику кількість α -токоферолів і γ -токоферолів (74-266 мкг/г та 32-107 мкг/г відповідно); антиоксидантних фенольних сполук (122-172 мг еквівалентів галоїної кислоти (GAE)/г розчинних), зокрема (+)-катехін (49-130 мг/100 г), епігалокатехін галат (EGCG) (21-35 мг/100 г), димер проціанідину В2 (7-21 мг/100 г), кверцетин з 3-рамнозидом (12-21 мг/100 г), агліконові флавоноли – кверцетин і міріцетин, флавонолдамнозиди та низку інших; а також певну кількість конденсованих танінів (у середньому 50-59 мг/г).

До відходів входить і маса шкірки плода, що становить до 1% від його маси [16, 17]. Усі ці речовини, так само як і бланшувальна вода, за зміни технологічного підходу можуть бути використані у відповідних косметологічних засобах.

Ядра кісточок абрикоса містять 45-55% олії. Поряд із цим до їх складу входять різні біологічно активні сполуки: антоціани, флавоноїди, токоферолі, каротиноїди, вітаміни Е, білки, незамінні амінокислоти та інші.

Серед фенольних сполук виявлено кавову кислоту, галоїїну кислоту, епікатехін, рутин та хлорогенову кислоту; серед флавоноїдних сполук – кверцетин, катехіни та хлорогенову кислоту; серед антоціанів – лютеїн, β -каротин і зеаксантин; серед каротиноїдів – β -каротин, α -каротин, γ -каротин; серед токоферолів – γ -токоферол, який становить основну частку (близько 91-94%), а також α - і δ -токоферолі.

За різними даними, олія містить 4,71-5,4% пальмітинової кислоти, 0,7% пальмітолеїнової кислоти, 0,91% стеаринової кислоти, 60,0-70,0% олеїнової кислоти та 0,17-1,5% ліоленової кислоти [18-23]. Макуха абрикосових кісточок, що залишається після вилучення олії, містить до 10% сирих ліпідів, тобто в середньому 10-15% від початкового вмісту. Разом із ними у відходи потрапляє до 20-50% (від початкового вмісту) супутніх біологічно активних сполук. У макусі також міститься шкірка абрикосових кісточок, яка збагачена поліфенолами, зокрема фенольними

кислотами, антоціанами та флавоноїдами. Усі ці сполуки характеризуються антиоксидантними та антибактеріальними властивостями [24-27].

Олія мигдалю, як і олії багатьох інших олійних культур, складається переважно з олеїнової (68,6-75,3%), лінолевої (19,4-21,4%) та пальмітинової (6,3-6,7%) кислот. Поряд із ними у невеликих кількостях (0,1-2%) виявлено також низку інших кислот [28]. Середній вміст олії в ядрах мигдалю становить, за різними даними, 40-67% від сухої маси. Це зумовлено сортовими особливостями та такими факторами, як ґрунтово-кліматичні умови [29-30]. Неомилювана фракція в олії пов'язана з наявністю токоферолів, токотрієнолів, фосфоліпідів, стеролів, фітостеринів, фітостанолів, сфінголіпідів, сквалену та терпенів [31, 32]. У макусі мигдалю вміст олії може сягати 10-15,0%. За різними літературними даними, вміст у ній олії, білка та сирової клітковини варіює відповідно від 8,8%, 49% і 5,9% до 16,25%, 37% і 5%.

Орієнтуючись на кількісний вміст олії в початкових ядрах, у середньому втрати олії під час її отримання становлять до 25-30%. Макуха також містить значну кількість неліпідних фракцій мигдалю, зокрема макроелементи: калій (1473,4 мг·100 г⁻¹), кальцій (895,8 мг·100 г⁻¹), магній (536,1 мг·100 г⁻¹) і фосфор (522,3 мг·100 г⁻¹), а також низку фенольних сполук: галокатехін (1321,5 ppm), епігалокатехін, кверцетин, галова кислота, п-кумарова кислота, ресвератрол, гідрат кверцетину, катехін тощо. Усі ці сполуки наявні в достатньо великій кількості, придатній для подальшого використання [33].

Маса шкірки плода, що становить до 1% від його маси, містить значну кількість α -токоферолів і γ -токоферолів (74-266 мкг/г та 32-107 мкг/г відповідно), а отже, і суттєву кількість вітаміну Е. У ній також наявні антиоксидантні фенольні сполуки (122-172 мг еквівалентів галової кислоти/г розчинних), зокрема (+)-катехін (49-130 мг/100 г), епігалокатехін галат (EGCG) (21-35 мг/100 г), димер проціанідину В2 (7-21 мг/100 г), кверцетин із 3-рамнозидом (12-21 мг/100 г), агліконові флавоноли – кверцетин і міріцетин, флавонолрамнозиди та низка інших, а також певна кількість конденсованих танінів (у середньому 50-59 мг/г).

Крім того, у відходи потрапляє вода після бланшування, що містить фенольні сполуки [34-38]. До складу мигдалевої шкірки також входять загальні харчові волокна, жир (9,5-24,2%), білок (10,3-12,8%), цукри (4,14-5,65%) [39, 40]. Окрім цього, у відходи потрапляє бланшувальна вода (як і у випадку з багатьма олійними культурами), що містить фенольні сполуки, яку можна використовувати як водну фазу під час одержання лікарських форм [41-45].

Насіння гарбуза містить до 50% олії. В олії основними є олеїнова, лінолева, пальмітолеїнова, гептадецена та ейкозенова кислоти; серед насичених жирних кислот – пальмітинова, стеаринова, міристинова, маргарінова, арахінова, бегенова та лігноцеринова кислоти; серед поліненасичених – α -ліноленова та γ -ліноленова кислоти [46-47]. У складі ядер

кісточок присутня значна кількість білків (як і в інших олійних культурах). Їхній вміст коливається від 14,1 до 45,3%. Виявлено: 84,74% альбуміну, 7,66% глобуліну, 1,16% проламіну та 3,52% глутеліну. Серед незамінних амінокислот визначено аргінін і лейцин (16,2-21,6), серед замінних – глутамінова кислота. Насіння гарбуза, поряд з оліями, містить токофероли, каротиноїди, провітаміни, пігменти, сквален, сапоніни, фітостероли, фенольні сполуки, мінеральні речовини (солі магнію, калію, фосфору, цинку, марганцю, заліза, кальцію, натрію та міді) та низку інших. Усі ці сполуки застосовуються у складі фармацевтичних і косметичних засобів для лікування шкірних захворювань. Деякі з них описані в працях [48-50].

Олія є джерелом фенольних сполук. За літературними даними, її вміст може становити 27,52 мг еквівалентів галоїної кислоти на грам метанольного екстракту, а також відзначається високий вміст загальних токоферолів, що надає їй досить виражених антиоксидантних властивостей [51]. Вона містить сквален (до 500-650 мг на 100 г олії), каротиноїди (до 1,5-4,9 мг/100 г), токохроманолі [52-54]. На відміну від інших рослинних олій, де основними компонентами є Δ^5 -стероли (β -ситостерол, кампестерол і стигмастерол), встановлено, що олія насіння гарбуза містить специфічні високоактивні Δ^7 -фітостероли.

У макусі залишається 8-14% олії. Макуха насіння також містить сирий білок (30-40 г/100 г сухої маси), мінеральні домішки (3-5 г/100 г сухої маси), вуглеводи (10-15 г/100 г сухої маси). Судячи з профілю жирних кислот, що залишаються в макусі, він є подібним до звичайної гарбузової олії. Під час отримання олії до макухи разом із залишками олії переходить до 50% інших біологічно активних сполук.

Таке різноманіття біологічно активних речовин – як у продуктах, що використовуються для отримання олії, у самій олії, так і у відходах – дає підстави прогнозувати широкий спектр дії цих сполук. Насіння зазвичай вважають відходами, проте в багатьох дослідженнях, виходячи з його хімічного складу та фітохімічного профілю, воно розглядається як відновлюваний ресурс. Водночас брак знань і технологічних рішень досі перешкоджає повному використанню цього цінного побічного продукту [55].

Виходячи з наведених даних, під час отримання олій з олійної рослинної сировини традиційним методом пресування їхні втрати можуть досягати 10-30% від початкового вмісту в сировині. У макусі після вилучення олії вміст біологічно активних речовин може становити до 50% від початкового вмісту. Перехід на нові методи отримання без використання органічних розчинників є трудомістким і потребує дорогої апаратури, що призводить до підвищення вартості кінцевої продукції. Водночас зі збільшенням виходу олії вміст біологічно активних речовин у макусі залишається практично на тому самому рівні. Це знижує біотехнологічну та терапевтичну активність отриманої олії. Під час переробки рослинної сировини з порівняно невисоким вмістом олії відбувається подальше зменшення виходу порівняно з початковим вмістом у сировині. У разі використання насіння амаранту, вирощеного в Грузії, вихід олії становить 5-

5,5%. Очевидно, більш доцільним є комплексне використання всієї гами нативних біологічно активних речовин, наявних у сировині.

Авторами цієї статті запропоновано новий варіант технологічного підходу, що дає змогу використовувати практично всі складові частини олійних культур як із нормальним, так і з низьким вмістом олії. При цьому скорочується кількість технологічних стадій, які зазвичай застосовуються у виробництві низки лікарських форм – кремів, мазей, масок.

Раніше, як нами, так і іншими авторами, для окремих видів сировини застосовувався цей метод використання нативних рослинних природних речовин [56-59]. За існуючою технологією в біомедичних, косметичних та інших препаратах використовуються окремо виділені сполуки, необхідні лише для створення конкретного засобу з вузьким спектром застосування.

Однак під час отримання лікарських форм для лікування шкірних захворювань (у косметичці, біомедицині, натуропатії, фармації) потрібен ширший спектр лікувальної дії, чому сприяє комбінація олії з іншими біологічно активними речовинами, що містяться в рослині. У цьому випадку передбачається проведення комплексного лікування.

У процесі розробки запропонованих нами засобів були створені вищезазначені форми, у яких як біомедичні речовини використано насіння амаранту, вирощеного в Грузії. Вивчення їхніх фізико-хімічних характеристик за рекомендованими тестами показало повну відповідність чинним вимогам. Розроблено основні стадії, що визначають подібний процес:

1. Очищення сировини від забруднень.
2. Подрібнення сировини у роторному подрібнювачі до отримання порошкоподібної фракції з необхідним розміром частинок.
3. У разі потреби – видалення з цієї фракції токсичних речовин.
4. Короткочасна стерилізація фракції.
5. Підбір основи для отримання лікарської форми.
6. Вибір основи з найбільшим коефіцієнтом сольобілізації з отриманою фракцією та стабільністю форми протягом визначеного часу.
7. Отримання варіантів лікарської форми (крем, мазь, лосьйон, маска).
8. Сольобілізація з нею деяких речовин, що сприяють підвищенню як її стабільності, так і окремих біологічно активних компонентів, які входять до складу лікарської форми (у разі потреби).
9. Передача розроблених засобів на біологічні випробування.

Висновки. У результаті проведеного дослідження встановлено: насіння рослини *Amaranthus cruentus* L., вирощеного в Грузії, містить біологічно активні речовини, аналогічні даним літератури. Це дає змогу рекомендувати їх для використання у біотехнології, медицині, косметичці, фармацевтичних композиціях танутрицевтиці. Насіння належить до групи рослин із відносно низьким вмістом олії.

Отримання літературних даних з питання технології переробки олійної сировини показало, що традиційні методи пов'язані зі значними втратами олії та переходом у відходи великої кількості супутніх біологічно активних речовин. Ці сполуки також сприяють підвищенню біологічної активності. Тому найбільш доцільним є виділення та використання в нативному вигляді всієї сукупності біологічно активних речовин разом з олією. У цьому випадку втрати як їх, так і олії знижуються. Застосовуючи цей метод і використовуючи насіння зазначеної рослини, було розроблено низку лікарських форм у вигляді кремів, мазей та масок. Їхні фізико-хімічні характеристики за рекомендованими тестами продемонстрували повну відповідність чинним вимогам.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Justyna Baraniak, Małgorzata Kania-Dobrowolska. The Dual Nature of Amaranth – Functional Food and Potential Medicine. *Foods*. 2022, 11(4), 618.
2. Salvo A., La Torre G.L., Rotondo A. et al., Determination of squalene in organic extra virgin olive oils (EVOO) by UPLC/PDA using one-step SPE sample preparation, *Food Analytical Methods*. 2017, 10, No. 5, 1377–1385.
3. Pramparo M., Prizzon S., Martinello M.A., Martinello M.A., Study on the purification of fatty acids, tocopherols, and sterols from deodorized distillate., *Grasas y Aceites*. 2025, 56, No. 3, 228–234.
4. Tsujimoto M., Squalene: A highly unsaturated hydrocarbon in shark liver oil, *Industrial and Engineering Chemistry*. 2020, 12, No., 63–72.
5. Ovidiu Popa, Narcisa Elena Băbeanu, Ioana Popa, Sultana Niță, et al. Methods for Obtaining and Determination of Squalene from Natural Sources. *Bio Med Research International*. 2021, V. 2015, Issue 1, 367202.
6. Sugeng Heri Suseno, Roni Nugraha, Farah Nurjannah, Wahyu Ramadhan and others. Stability of shark (*Centrophorus* sp.) liver oil rich in squalene as an. *BIO Web of Conferences*. 2024, 106, 05006.
7. S.Hadinoto. Characteristics Squalene of Smallfin Gulper Shark (*Centrophorus moluccensis*) Livers From Aru Islands, Mollucas, Indonesia. *J. Phys.: Conf. Ser.* 2020, 1463 01202.
8. Methods for Obtaining and Determination of Squalene from Natural Sources Ovidiu Popa, Narcisa Elena Bsbeanu, Ioana Popa, Sultana Nit,s, 2 and Cristina Elena Dinu-Pârnu3. *Biomed Res Int*. 2015:2015:367202.
9. Saseendran Shalu, Panam Kunnel Raveendranathan Karthikanath, Vinoth Kumar Vaidyanathan, Lars M Blank et al. Microbial Squalene: A Sustainable Alternative for the Cosmetics and Pharmaceutical Industry – A Review *Eng Life Sci*. 2024 Aug 27;24(10):e20240
10. Chen Huang, Xiaojin Song, Qiu Cui, Yingang Feng et al. Optimization of Squalene Production by *Pseudozyma* sp. P4-22 Chen Huang, Xiaojin Song, Qiu Cui, YingangFeng et al. *Molecules* 2025, 30(7), 1646;
11. Alok Patel, Maurizio Bettiga, Ulrika Rova, Paul Christakopoulos et al, Microbial genetic engineering approach to replace shark livering for squalene. *Trends Biotechnol. Trends in Biotechnology* Volume 40, Issue 10, October 2022, Pages 1261-1273.
12. Katarzyna Król, Magdalena Gantner. Morphological Traits and Chemical Composition of Hazelnut from Different Geographical Origins: A Review. *Agriculture* 2020, 10(9), 375.

13. Jiayang Sun, Xiaonuo Feng, Chunmao Lyu, Shuang Zhou et al. Effects of different processing methods on the lipid composition of hazelnut oil: A lipidomics analysis. *Food Science and Human Wellness*. Volume 11, Issue 2, March 2022, P. 427-435.
14. Huseyin Irfan Balik. Bioactive Compounds and Fatty Acid Composition of New Turkish Hazelnut Varieties. *International Journal of Fruit Science* Volume 21, 2021 P. 106-114.
15. Cesarettin Alasalvar, Bradley W. Bolling. Review of nut phytochemicals, fat-soluble bioactives, antioxidant components and health effects. *British Journal of Nutrition* (2015), 113, 68–78.
16. Jiangzhao Jiang, Lisong Liang, Qinghua Tiantian Zhao and others immunostimulant. *BIO Web of Conferences* 106, 05006 (2024) ICMS 2023 Kernel Nutrient Composition and Antioxidant Ability of *Corylus* spp. In China. *Front. Plant Sci.*, 2021, Sec. Crop and Product Physiology, Volume 12, p. 214- 226.
17. Gürkan Alp Kağan Gürdil, Abraham Kabutey, Kemal Çağatay Selvi, Čestmír Mizera et al. Evaluation of Postharvest Processing of Hazelnut Kernel Oil Extraction Using Uniaxial Pressure and Organic Solvent. *Processes* 2020, 8(8), 957.
18. Krantideep R Pawar, Prabhat K Nema. Apricot kernel characterization, oil extraction, and its utilization: A review. *Food Sci Biotechnol*, 2023; 32(3):249–263
19. Mansoor Ali Akhone, Aarti Bains, Mansuri M Tosif, Prince Chawla et al. Apricot Kernel: Bioactivity, Characterization, Applications and Health Attributes. *Foods*, 2022 ;11(15):2184.
20. Ioannis Makrygiannis, Vassilis Athanasiadis, Theodoros Chatzimitakos, Martha Mantiniotou et al. Unveiling the Potential of Apricot Residues: From Nutraceuticals to Bioenerg. *Waste* 2024, 2(1), 1-28.
21. Semval P.C, Semval A, Bhatt S.P, Parashar T et al. Apricot-A new Source of Chemically Active Constituents: A medical Overview. *Biomed Pharmacol. J.*, 2023;16(2).
22. Mustafa K, Cross J. Production, pomological and nutraceutical properties of apricot. *J. Food Sci. Technol.* 2019; 56:12–23.
23. Qin F., Yao L., Lu C., Li C., Zhou Y., Su C., Chen B., Shen Y. Phenolic composition, antioxidant and antibacterial properties, and in vitro anti-HepG2 cell activity of wild apricot (*Armeniaca sibirica* L. Lam) kernel peel. *Food Chem. Toxicol.* 2019; 129:354–364.
24. Fangling Qin, Lu Yao, Cairui Lu, Cong Li. Et al. Phenolic composition, antioxidant and antibacterial properties, and in vitro anti-Hep G2 cell activities of wild apricot (*Armeniaca Sibirica* L. Lam) kernel skins. *Food and Chemical Toxicology*. Volume 129, July 2019, Pages 354-364
25. Nurhayat Çulluoğlu, Mehmet Arslan. Oil content and fatty acid composition of apricot varieties. II. International Agricultural, Biological & Life Science Conference, Edirne, Turkey, 1-3 September, 2020.
26. Krantidip R Pawar, Prabhat K Nema. Apricot kernel characterization, oil extraction, and its utilization: a review. *Food Sci Biotechnol.* 2023 Jan 7;32(3):249–263.
27. Rabbia Choudhry, Adeela Yasmin, Muhammad Arslan Aslam, Ali Imran et al. Extraction of protein from apricot kernel oil press cake (AKOPC) through innovative techniques and the formulation of supplemented yogurt. *Food science*, 2023, Volume 11, Issue 10, Pages 6085-6095.
28. A. A. Torabi, A. Imani, Vali Rabiei. Oil content of seeds of 25 Iranian, European, and American almond genotypes and cultivars. *Acta Horticulturae*, 2017, 912(912):367–369.
29. El Hassan SAKAR1, Mohamed El Yamani, Abdelali Boussakouran, Ahmed Zeroual et al. On the natural variability of kernel oil content in almond [*Prunus dulcis* Mill. DA Webb]: An Overview. *Journal of Analytical Sciences and Applied Biotechnology*. 2020, Vol. 2, Issue 1 Pages: 16-22.

30. José M Roncero, Manuel Álvarez-Ortí, Arturo Pardo-Giménez, Adrián Rabadán, José E Pardo. Influence of Pressure Extraction Systems on the Performance, Quality and Composition of Virgin Almond Oil and Defatted Flours. *Foods*. 2021, 11;10(5):1049.
31. Kodad O, Estopañán G, Juan T, Socias i. Company R. Tocopherol concentrations in almond oil from Moroccan seedlings: geographical origin and postharvest effects. *J. Food Compos. Anal.* 2014, 33, 161–165.
32. Kornsteiner M.W. Tocopherols and total phenolics in 10 different types of nuts. *Food Chem.* 2006, 98, 381–387.
33. Marta Barral-Martinez, Maria Fraga-Corral, Pascual García-Pérez, Jesus Simal-Gándara, et al. Almond by-products: adding value for the sustainability and competitiveness of the industry *Products*, 2021, 10 (8), 1793.
34. Stefan Ivanović, Nataša Avramović, Biljana Dojčinović, Snežana Trifunović и друге. Chemical Composition, Total Phenols and Flavonoids Contents and Antioxidant Activity as Nutritive Potential of Roasted Hazelnut Skins (*Corylus avellana* L.). *Foods* 2020, 9(4), 430.
35. Jake A. Pfeil, Yanyun Zhao, Robert J. McGorin Chemical composition, phytochemical content, and antioxidant activity of hazelnut (*Corylus avellana* L.) skins from Oregon. *LWT*, Volume 201, 1 June 2024, 116204.
36. Ana Campa Negrillo, Roberto Rodríguez Madrera, Belén Suárez Valles, Juan Jose Ferreira. Variation of Morphological, Agronomic and Chemical Composition Traits of Local. *Front Plant Sci.* 2021 Jun 15; 12:659510.
37. Marcin Kruk, Alicja Ponder, Joanna Horoszewicz, Damian Popławski. By-product hazelnut seed skin characteristics and properties in terms of use in food processing and human nutrition. *Scientific Reports*, 2024, 14(1).
38. Jiangzhao Jiang, Lisong Liang, Qinghua Ma, Tiantian Zhao. Kernel Nutrient Composition and Antioxidant Ability of *Corylus* spp. In China. *Front Plant Sci.* 2021;12:690966.
39. Vânia Silva, Ivo Oliveira, José Alberto Pereira, Berta Gonçalves. Almond By-Products: A Comprehensive Review of Composition, Bioactivities, and Influencing Factors. *Foods* 2025, 14(6), 1042.
40. Nadia Houmy, Reda Melhaoui, Kamal Belhaj, Aurore Richel et al.. Chemical characterization of almond meal as a co-product of the mechanical extraction of almond oil. *E3S Web of Conferences*, 2020, 183(7):0400.
41. Stefan Ivanović, Nataša Avramović, Biljana Dojčinović, Snežana Tri. At al.. Chemical Composition, Total Phenols and Flavonoids Contents and Antioxidant Activity as Nutritive Potential of Roasted Hazelnut Skins (*Corylus avellana* L.). *Foods* 2020, 9(4), 430.
42. Jake A. Pfeil, Yanyun Zhao, Robert J. McGorin Chemical composition, phytochemical content, and antioxidant activity of hazelnut (*Corylus avellana* L.) skins from Oregon. *LWT*, Volume 201, 1 June 2024, 116204.
43. Ana Campa Negrillo, Roberto Rodríguez Madrera, Belén Suárez Valles, Juan Jose Ferreira. Variation of Morphological, Agronomic and Chemical Composition Traits of Local. *Front Plant Sci.* 2021 Jun 15; 12:659510.
44. Marcin Kruk, Alicja Ponder, Joanna Horoszewicz, Damian Popławski. By-product hazelnut seed skin characteristics and properties in terms of use in food processing and human nutrition. *Scientific Reports*, 2024, 14(1).
45. Jiangzhao Jiang, Lisong Liang, Qinghua Ma, Tiantian Zhao. Kernel Nutrient Composition and Antioxidant Ability of *Corylus* spp. In China. *Front Plant Sci.* 2021; 12:690966.
46. Abdul Rohman, Irnawati Irnawati. Pumpkin (*Cucurbita maxima*) seed oil: chemical composition, antioxidant activities and its authentication analysis. *Food Research*, 2019, 4(3), p.578-584.

47. Nikolaos Polyzos, Ângela Fernandes, Ricardo C. Calhelha, Jovana Petrović et al.. Biochemical Composition of Pumpkin Seeds and Seed By-Products *Plants* 2024, 13(17), 2395.
48. Praveen Chandra Semwal, Amit Semwal, S. P. Bhatt, Tarun Parashar, et al.. Apricot- A New Source of Chemically Active Constituents: A Medicinal Overview *Biomedical and Pharmacology Journal*, v.16, no.2, pp.1133 – 1142.
49. Michalak, M. Plant-Originated Antioxidants: Importance in Skin Health and the Aging Process. *Int. J. Mol. Sci.* 2022, 23, 585.
50. Krimer-Malešević. *Nuts and Seeds in Health and Disease Prevention (Second Edition)* Akademik press .2020, p. 533-542.
51. Ihssan Boujemaa, Sarah El Bernoussi, Hicham Harhar, Mohamed Tabyaoui. Effect of Species on the Quality, Chemical Composition, and Antioxidant Activity of Pumpkin Seed Oil. *OKL*,2020, 27, p, 40.
52. Magdalena Grajzer, Weronika Kozłowska, Iwan Zalewski, Adam Matkowski et al...Nutraceutical Prospects of Pumpkin Seeds: A Study on the Lipid Fraction Composition and Oxidative Stability Across Eleven Varieties. *Foods* 2025, 14(3),354.
53. Jurgita KULAITIENĖ, Judita ČERNIAUSKIENĖ, Elvyra JARIENĖ, Honorata DANILČ. Antioxidant Activity and other Quality Parameters of Cold Pressing Pumpkin Seed Oil. *Not Bot Horti Agrobi*, 2018, 46(1), p.161-166.
54. Alexander Kröpfl, Alicia Harter, Walter Vetter. Quantification of tocotrienols and other tocopherols in edible plant oils by gas chromatography coupled with mass spectrometry. *Journal of Food Composition and Analysis*. Volume 143, July 2025, 107537.
55. Lovro Sinkovič, Aleš Kolmanič. Elemental composition and nutritional characteristics of Cucurbita pepo subsp. Pepo seeds, oil cake and pumpkin oil *Journal of Elementology*, 2021.
56. Pavel Yavich, Mzia Kakhetelidze, Bella Kikalishvili, On the possibility of using seaweeds as raw materials for producing cosmetics and cosmeceuticals (Review), *Georgian Scientists: Vol. 7 No. 2 (2025)*, p.242-254.
57. Chelidze N. A., Yavich P. A., Churadze L. I., Kakhetelidze M. B. The development of a technology of a medicinal cream, containing rhizomes of a White Cinquefoil Plant (*Potentilla Alba L.*) *World Journal of Pharmacy and Pharmaceutical Sciences*, 2020, Vol 9, Issue 5, p. 35- 41.
58. Sachin B. Somwanshi, Kiran S. Kudale, Ramdas T. Dolas et al.. Formulation and evaluation of cosmetic herbal face pack for glowing skin. *International Journal of Research in Ayurveda and Pharmacy*, 2017, 8(3):199-203.
59. Kalbaza Ahmed Yassine, Hemida Houari, Benchohra Mokhtar, Amara Karim et al.. A topical ointment formulation containing leaves' powder of *Lawsonia inermis* accelerate excision wound healing in Wistar rats. *Vet World*. 2020 Jul 7;13(7):1280–1289.

3.7 ОЦІНКА АНТРОПОГЕННОГО ВПЛИВУ БУДІВЕЛЬНИХ РОБІТ НА НАВКОЛИШНЄ СЕРЕДОВИЩЕ

Постернак І. М., Постернак О. С.

Одеська державна академія будівництва та архітектури, Україна
posternak.i@gmail.com

Забезпечити раціональне природокористування в процесі будівництва є можливим за рахунок глибокого вивчення самої проблеми та використання системного підходу щодо управління екологічними ризиками на основі розробок теоретичного та прикладного характеру. Розробка підходів щодо скорочення негативного впливу будівельної галузі на навколишнє середовище потребує дослідження будівельної галузі як основи сталого розвитку. Оцінка впливів на навколишнє середовище під час будівництва виконується в комплексному аналізі стану будівельного майданчика.

Ключові слова: *навколишнє середовище, будівельні роботи, антропогенний вплив, будівельний майданчик, екологічно раціональне природокористування.*

В умовах кризових явищ та нестабільності розвитку економіки, погіршення макроекономічних показників та відчутного зниження рівня життя населення особливого значення набувають питання оцінки впливу будівельної галузі на довкілля. Будівельна галузь є однією з основних галузей України, від рівня якої залежать інші галузі, але її розвиток пов'язаний із забрудненням довкілля та використанням природних ресурсів [1–3].

З метою запобігання шкоди довкіллю, забезпечення екологічної безпеки, його охорони, раціонального використання і відтворення природних ресурсів, у процесі прийняття рішень про провадження господарської діяльності, яка може мати значний вплив на навколишнє природне середовище, з урахуванням державних, громадських та приватних інтересів був прийнятий Закон України «Про оцінку впливу на довкілля» [4].

З 1 вересня 2022 року чинний ДБН А.2.2-1:2021 «Склад і зміст матеріалів оцінки впливів на навколишнє середовище (ОВНС)». Який застосовують для прийнятих проектних рішень з урахуванням обґрунтування економічних, технічних, організаційних, санітарних та інших заходів, спрямованих на забезпечення безпеки навколишнього середовища під час будівництва та експлуатації будівель і споруд будь-якого призначення та їх комплексів [5].

Мета дослідження. Виконати обґрунтування (дослідити) оцінки(ку) антропогенного впливу будівельних робіт на навколишнє середовище.

Предмет досліджень. Вплив будівельних робіт на довкілля .

Об'єкт досліджень. Навколишнє середовище.

Заснована на ринкових відносинах економіка завжди залежала й надалі буде визначатися рівнем розвитку будівельної галузі, що здатна

забезпечити нарощення виробничого потенціалу та інфраструктури як матеріальної, так і нематеріальної сфер.

В Україні будівельна галузь – провідна галузь народного господарства, де вирішуються життєво важливі завдання структурної перебудови матеріальної бази всього виробничого потенціалу країни і розвитку невиробничої сфери. Від ефективності функціонування будівельної галузі багато в чому залежать як темпи виходу країни із фінансово-економічних криз, так і конкурентоспроможність економіки.

Будівництво – головна ланка комплексу. Тут створюються основні фонди господарства. Від інших галузей будівництво відрізняється своєю продукцією (будівлі), яка є нерухомою, великогабаритною.

У силу своєї специфіки будівельна галузь і промисловість будівельних матеріалів дуже тісно взаємодіють між собою, а тому сучасне виробництво будівельних матеріалів більше ніж наполовину зосереджено в рамках будівельної галузі, тобто в системі підрядних будівельних організацій.

Більше того, від розвитку будівельної галузі та промисловості будівельних матеріалів залежить будівництво житла, створення нових міст і сіл, окремих мікрорайонів, постійна реконструкція житлових фондів, будівництво промислових і сільськогосподарських підприємств, транспортних об'єктів, лікарень, шкіл, торгових центрів тощо. А також будівельна галузь підтримує в належному стані обороноздатність країни, створює передумови для зростання виробництва в усіх галузях господарства.

Разом із тим, сучасна будівельна галузь потребує не тільки впровадження економічних методів, але й пошуку рівноваги, при котрому виготовлення й використання різноманітних матеріалів і конструкцій не буде становити загрозу для здоров'я людини та надаватиме можливості зберігати та відновлювати природні ресурси.

Щодо перспективи розвитку будівельної галузі, то нині остання є сферою, на яку покладено стратегічно важливі цілі розвитку України, а саме – забезпечення населення новими робочими місцями, житлом, збільшення надходження до бюджетів різних рівнів, і, як наслідок, – зростання рівня та якості життя населення.

Деструктивними факторами діяльності будівельних підприємств є:

1. Техніко-економічні (слабкість матеріальної та науково-технічної бази, домінування традиційного виробництва, застаріла техніка та технологія, орієнтація на короткострокові цілі, недостатність коштів для ризикових проектів).

2. Організаційно-управлінські (висока централізація та консервативність організаційної структури, відсутність інноваційної стратегії, повільне розроблення та впровадження інновацій).

3. Інформаційно-комунікативні (недостатня інформація про інновації, відсутність захисту власності на інформаційні ресурси, замкненість і обмеженість міжгалузевих зв'язків).

4. Соціально-психологічні (стереотипи поведінки, страх, опір усьому новому, збільшення невизначеності).

5. Правові (антимонопольне, податкове, патентно-ліцензійне та кредитне обмеження).

Парадоксальність сучасного розвитку полягає в тому, що будівельна галузь з одного боку сприяє економічному розвитку та підвищенню рівня і якості життя населення, а з іншого – негативно впливає на навколишнє середовище, знижуючи цю якість життя. Майже дві третини, а то й більше, свого життя сучасна людина проводить у приміщеннях, побудованих із залізобетону, керамзитобетону, шлакобетону, часто з токсичними хімічними домішками для покращання якості, умов твердіння тощо.

Треба відмітити, що діяльність будівельних підприємств пов'язана з використанням природних ресурсів, впливом на природні об'єкти, і тим самим зумовлює порушення рівноваги в природному середовищі. Відтак є всі підстави говорити про будівельну галузь як джерело утворення екологічних загроз.

Питання взаємодії суспільства та природи, охорони навколишнього середовища й раціональне природокористування з метою забезпечення сталого розвитку є вагомими орієнтирами в прийнятті ефективних підприємницьких рішень на всіх рівнях національної економіки, а також для всіх галузей економіки, у тому числі будівельної.

Нераціональне, а в деяких випадках виснажливе природокористування в Україні теоретики й практики [1...3] пов'язують із недосконалою законодавчою та нормативною базою у сфері природокористування, високим рівнем морального та фізичного зносу основних фондів, низьким рівнем вітчизняних технологій, із високою матеріало- та енергоємністю національного продукту.

Вплив підприємств будівельної галузі на довкілля проявляється в різних аспектах:

По-перше, будівництво починається з відчуження земель, розчищення територій, зрізання рослинного шару й проведення земляних робіт. Площа земель, яка може бути використана для потреб сільського господарства, обмежена й практично вичерпана. При освоєнні будівельних майданчиків руйнується родючий шар ґрунту і рослинний покрив, відбуваються докорінні руйнування біогеоценозів. Верхній родючий шар ґрунту руйнується й на територіях, які використовуються тимчасово. На жаль, вимоги норм про збереження ґрунту відносяться тільки до сільськогосподарських угідь (вони рекультивуються), тому що збереження ґрунту підвищує вартість будівництва.

Отже, при благоустрої території замість знищеного шару завозиться ґрунт із угідь. У результаті земляних робіт розробляються мільярди кубічних метрів ґрунту за рік. Більша частина розробленого ґрунту йде у відвали. Розробка й перевезення ведуть до забруднення повітря пилом, токсичними вихлопами газів будівельних, дорожніх машин і транспорту. Відвали вивезеного ґрунту змінюють природний ландшафт, морфологію ділянок земної поверхні, сприяють ерозії тощо. Усе це створює несприятливі умови для життя людей.

По-друге, впливають на навколишнє середовище та людину самі будівельні матеріали (радіоактивність, токсичність, пилоутворення), які використовуються в будівництві, будівельні машини і транспорт, організація і культура виробництва (руйнування ґрунтового шару тимчасовими під'їзними шляхами, токсичні викиди машин і транспорту, шум, вібрація, електромагнітні поля).

По-третє, будівництво супроводжується великим обсягом будівельних відходів. Разом зі сміттям щорічно в будівництві втрачається більше 1 млн. т металу, 30% скла, до 15% цементу, до 17% цегли перетворюється на бій та йде у відходи, а 40% цеглин мають ті чи інші пошкодження. За рік на звалища викидається до 2 млн. тонн асфальтобетону, який містить до 120 тис. т бітуму, а також пісок, гравій, інші матеріали. Одні відходи вивозять на розміщені довкола міста звалища, частину спалюють на будівництві або на звалищах, частину закопують, що негативно впливає на ґрунт, повітряне середовище, водойми.

Роботи на майданчиках із будівництва різних об'єктів негативно відбиваються на стані навколишнього середовища. Ступінь впливу залежить від виду матеріалів, які використовуються, від технології зведення об'єкта, технологічного оснащення будівельного виробництва, типу і якості машин, механізмів і транспортних засобів, типів і потужності двигунів, організації технологічних процесів.

До короткотермінових впливів при виконанні будівельних робіт можна віднести: пил, піднятий на будмайданчиках та під'їзних дорогах, а також пил від вантажних автомобілів, які перевозять матеріали; пил, що виникає при виконанні окремих будівельних робіт; викиди отруйних речовин при використанні матеріалів, до складу яких входять бітумні смоли, олійні фарби; стічні води з будівельних майданчиків; шкода, завдана земляними роботами; шум і вібрація, викликані будівельними машинами та процесами; забруднення твердими відходами.

Короткотермінові негативні впливи на навколишнє середовище, які неодмінно виникають при виконанні будівельних робіт чи реконструкції, треба зводити до мінімуму правильним плануванням і застосуванням попереджувальних заходів, а після закінчення робіт вживати заходи по відновленню й рекультивації місць розташування будмайданчиків і прилеглих територій.

З одного боку, будівельна галузь у цілому та будівництво житла зокрема, вирішують численні проблеми щодо забезпечення житлом та нежитловими приміщеннями. Проте, з іншого боку, виконання будівельних робіт може негативно позначитися на здоров'ї населення та всього природного ландшафту. Визначимо наслідки розвитку будівництва житла (рис. 1) [1–3].

Дослідження довкільних процесів показує, що повітряному басейну в районі проведення будівельних робіт найбільшої шкоди завдає експлуатація транспорту, опалювального обладнання, використання

будівельних матеріалів із ароматичними добавками, що поширюються через повітря і впливають на живі організми.

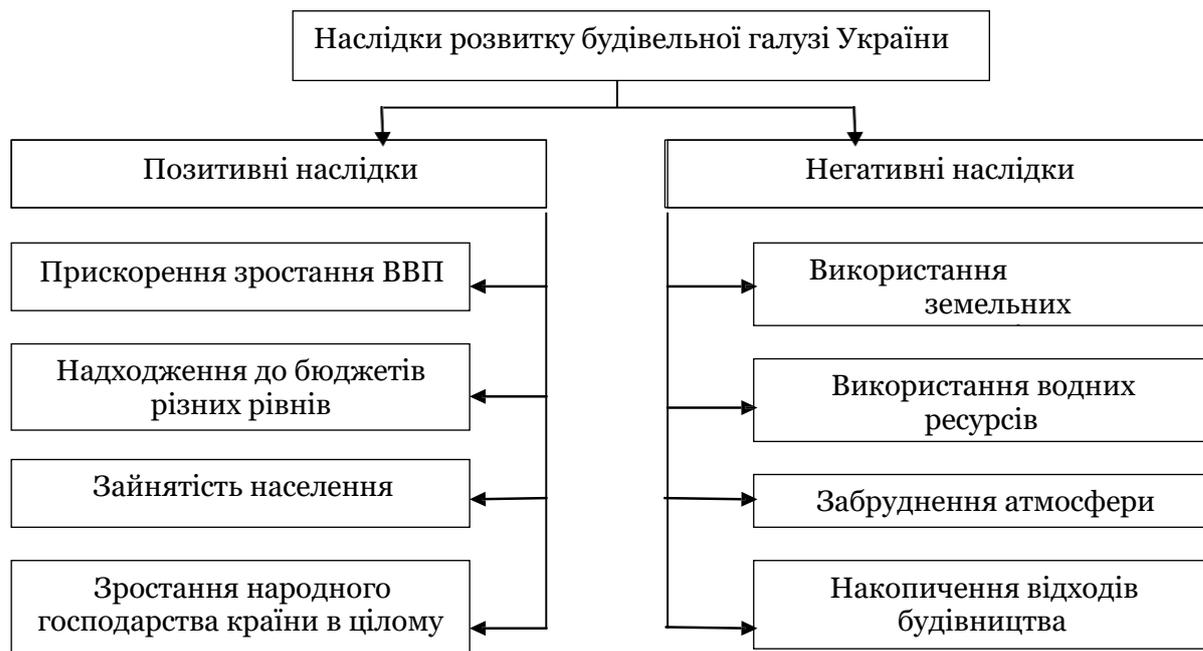


Рис. 1. Наслідки розвитку будівельної галузі

Розглянемо шкідливий вплив будівництва за [1,2,6]:

А. Джерелами забруднення. Важливо визначати масу основних забруднюючих речовин: оксид вуглецю, вуглеводню, окисів азоту та сірки, сажі.

В атмосфері відпрацьовані гази та утворення подразливих і загальнотоксичних речовин вступають між собою в фотохімічні реакції. У великих об'ємах подібні явища утворюють смог. Тому розглянемо, як це відбувається.

А.1. Оксиди вуглецю (паралізують органи дихання).

А.2. Оксиди азоту (отрують тканини організму, і дратівливо діють на слизові оболонки організму).

А.3. Вуглеводні (впливають на очі та ніс, шкодять рослинності навколо).

А.4. Сажа: Неповне згорання палива викликає реакцію, за якою частина вуглеводнів стає сажею, що містить смолянисті речовини. Багато сажі й смол утворюється під час форсування двигуна. Ця речовина засмічує органи дихання, подразнюючи їх і викликаючи легеневі захворювання. Найбільш шкідливим фактором сажі є те, що вона переносить канцерогени через наявний ефект адсорбції.

А.5. У будівельних матеріалах також присутні ароматичні речовини. Багато сучасних будівельних матеріалів доволі часто мають низьку якість через елементи, шкідливі для навколишнього середовища (формальдегід, фенол, полівінілхлорид, діоксини, толуол). Ароматичні вуглеводи належать до забруднюючих елементів. Найчастіше вони містяться у фарбах, лаках та іншій подібній продукції.

Б. Ресурсами. Об'єкти навколишнього середовища, на які впливає будівництво, робота будівельних майданчиків та інших будівництв: клімат і мікроклімат; повітряне середовище; шумове забруднення повітря; вібрація та електромагнітне випромінювання; ґрунт та водне середовище; рослинний і тваринний світ; техногенне середовище; соціальне середовище.

Б.1. Шумовий вплив у районі виконання будівельних робіт. Шумами називають звуки, які спричиняють дискомфорт і викликають певний негативний вплив на організм людини. Порогом дискомфорту населення є LA, еквівалентний 55...60 дБА. Поряд із викидами в атмосферу забруднюючих речовин основним джерелом забруднення вважається й шумовий вплив будівельних робіт. Він значно підвищує нервову напругу працівників та населення, знижуючи робочу продуктивність, викликає чимало захворювань, врешті-решт, заважає відпочинку й знижує ефективність слуху. На цей рівень впливають два основних фактори: інтенсивність будівельних робіт та відсутність поверхонь, які відбивають звукову хвилю. Такими поверхнями частіше за все є будівлі, за першою лінією яких рівень шуму й концентрації шкідливих речовин знижується до визначеної норми.

Б.2. Вібрація. Будівельні роботи супроводжуються вібрацією, що впливає на людину через механічну систему й характер будівельних робіт. Під час проведення будівництва виникають, в основному, два види вібрації: безпосередня взаємодія будівельних механізмів із ґрунтом та будівлями, при цьому коливання розповсюджуються через ґрунт; вплив потужних механізмів під час виконання земельних робіт та забивання бетонних стовбурів, що розповсюджується через повітряне середовище. Цей різновид коливань викликає неприємний шум, що негативно впливає на стан сусідніх споруд у деяких випадках.

Вібрація, що впливає на будівлі, розташовані біля будівельних майданчиків, зростає за умов збільшення інтенсивності руху. Інтенсивність вібрацій, здатна передаватись будівлям і спорудам, залежить від кількох факторів, серед них – кількість робіт, їхня інтенсивність, конструкція механізмів та навіть сам тип ґрунтів. Вібрації ґрунту обумовлюються тимчасовим стисненням під час проходження будівельної техніки, після чого відбувається швидке зняття навантаження. Від щільності й вогкості ґрунту, а також від ступеня його однорідності й гранулометричного складу залежить і частота коливань, яка в середньому складає від 10 до 25 Гц.

Б.3. Пил. Частки пилу мають рихлу поверхню, що дозволяє абсорбувати в собі шкідливі речовини. У подальшому ці пилові частини разом із повітрям затримуються в носоглотці та легенях, що сприяє проникненню в організм людини шкідливих речовин. Пил дещо змінює клімат, викликає тумани, смоги, знижує освітленість. Коли концентрація пилу зростає до 0,03 мг/м³, загальна видимість падає до 4 км, і при концентрації пилу 1 мг/м³ – до 1 км. А це може сприяти утворенню аварій. Зменшується кількість освітлення розсіяним світлом. Пилове заповнення переміщує межу ультрафіолетового спектру праворуч, через що відсікається

коротке проміння, важливе в біологічному значенні. Відбувається так звана еритемна дія, через яку уповільнюється синтез вітаміну D в шкірі. Також спостерігається зменшення дезінфікуючої властивості.

Отже, найбільше будівельна галузь забруднює навколишнє середовище через проведення земляних та монтажно-бетонних робіт. На це впливає концентрація роботи техніки та інших механізмів, споживаючих паливно-мастильні матеріали. Саме вони призводять до значного утворення пилу, перетворюючи та змінюючи фізичні якості ґрунтів.

Для зменшення негативного впливу на навколишнє середовище та суспільство варто раціонально поєднувати економічні та екологічні складові ще на стадії розробки та прийняття будівельних проектів шляхом оцінки пов'язаних із проектом потенційних екологічних ризиків і впливів. Пояснюється це тим, що під час проведення етапу проектування створюється взаємозв'язок між об'єктом і довкіллям, тому ступінь екологічної обґрунтованості й продуманості проекту визначає не тільки якісний стан навколишнього середовища, але й величину майбутніх збитків від ліквідації негативного антропогенного впливу та оновлення довкілля.

Українські державні будівельні норми та правила передбачають обов'язкове проведення Оцінювання впливу на навколишнє середовище (ОВНС) на стадії подачі матеріалів проектів будівництва. Під час підготовки ОВНС необхідною умовою є дотримання Закону про охорону навколишнього середовища та Закону про екологічний контроль. Ці закони належним чином охоплюють правила й норми, які стосуються поліпшення санітарних умов, захисту навколишнього середовища, протипожежного захисту тощо під час будівництва. Процедура ОВНС введена в багатьох країнах завдяки Програмі ООН із навколишнього середовища (UN Environmental Programme, UNEP) [UN Environmental Programme], а Директива щодо оцінки впливу окремих державних та приватних проектів на довкілля від 3 березня 1997 р. розширила коло проектів, що підлягають оцінці впливу на рівні держав – членів ЄС. Як зазначається в ДБН, метою ОВНС є оцінювання екологічного впливу діяльності проекту та методів його реалізації, а також визначення методів і шляхів нормалізації стану довкілля у відповідності з вимогами екологічної безпеки [3].

Зазначимо, що аналіз збитків від екологічних порушень, що виникають у результаті будівництва, експлуатації спеціальних машин та механізмів та утилізації відходів будівництва може стати підґрунтям для оцінки екологосумності будівельної галузі, що дозволить відвертати збитки або зменшувати негативний вплив на навколишнє середовище.

Висновки. Варто зазначити, що будівництво не лише одна з провідних галузей економіки, але й один із найбільших факторів антропогенного впливу на всі елементи навколишнього середовища. До того ж, нині зростає значення будівельної галузі в процесі життєдіяльності людей. Проживання в малих чи великих містах має як переваги, так і недоліки. Останні загрожують нормальному процесу відновлення сил людини, є причиною невиліковних хронічних хвороб тощо. Екологічно раціональне природокористування

дозволяє, з одного боку, забезпечити економіку всіма необхідними ресурсами та створити умови для розширеного відтворення, а з іншого – мінімізувати негативний вплив на довкілля.

Забезпечити раціональне природокористування в процесі будівництва є можливим за рахунок глибокого вивчення самої проблеми та використання системного підходу щодо управління екологічними ризиками на основі розробок теоретичного та прикладного характеру. Розробка підходів щодо скорочення негативного впливу будівельної галузі на навколишнє середовище потребує дослідження будівельної галузі як основи сталого розвитку.

Оцінка впливів на навколишнє середовище під час будівництва виконується в комплексному аналізі стану будівельного майданчика зі встановлюються вимог до: розміщення під'їзних доріг та стоянок автотранспорту; підйомно-транспортних механізмів, будівельного обладнання, електроприладів, інструментів тощо; інженерного облаштування побутових приміщень та складських об'єктів; видалення або утилізації будівельних відходів та рекультивації земель після завершення будівельної діяльності; вибору оптимальних технологічних рішень, що знижують негативний вплив будівництва на навколишнє середовище до нормативного рівня.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Зубко К.Ю., Лук'янихін В.О.. Аналіз впливу результатів будівництва на навколишнє природне середовище. *Веб-сайт eSSUIR – Electronic Sumy State University Institutional Repository: (Електронний архів Сумського державного університету)*. URL: <https://essuir.sumdu.edu.ua/bitstream-download/123456789/26666/1/Zybko.pdf;jsessionid=BAE5E811733464429F7826E372DE257A>
2. Мальований М.С., Боголюбов В.М., Шаніна Т.П., Шмандій В.М., Сафранов Т.А. Техноекологія: *підручник* / За ред. М.С.Мальованого. – Львів: Нац. Універ. «Львівська політехніка», 2013. – 424 с. URL: https://www.kdu.edu.ua/new/PND_vid/PIDRUCHNIK_TE.pdf
3. Підготовка звіту з оцінки впливу на довкілля при будівництві та реконструкції автодоріг: методичний посібник / Зуб Л.М., Костюшин В.А., Хрутьба В.О., Левіна Г.М., Сумський Є.Д., Пилипович О.В., Костюшин Є.В., Матус С.А., Ямелинець Т.С., Галайко М.Б. – Київ, 2019. – 108 с. URL: https://www.interreg-danube.eu/uploads/media/approved_project_output/0001/35/ac3f9cab374ab1227bf6a3bf35369fef74fb306.pdf
4. Закон України «Про оцінку впливу на довкілля» від 23.05.2017 р. № 2059-VIII зі змінами та доповненнями. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2059-19#Text>
5. ДБН А.2.2-1:2021 «Склад і зміст матеріалів оцінки впливів на навколишнє середовище (ОВНС). 2022. Київ: Міністерство розвитку громад та територій України. 22с. URL: https://www.minregion.gov.ua/wp-content/uploads/2022/06/dbn-a.2.2-1_2021.pdf
6. Екологічна безпека технологічних процесів у галузі: *Курс лекцій: навч. Посіб. Для студ. Спеціальності 161 «Хімічні технології та інженерія» спеціалізації «Хімічні технології неорганічних керамічних матеріалів»* / КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад.: В.М. Павленко, В.Ю. Тобілко. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 145 с. https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/41512/1/Ekologichna_bezpeka.pdf

3.8 ГАРМОНІЗОВАНЕ УПРАВЛІННЯ ЯКІСТЮ ТА БЕЗПЕЧНІСТЮ ВЗУТТЯ НА РИНКУ УКРАЇНИ

Омельченко Н. В., Браїлко А. С.

Державний заклад «Луганський національний університет
імені Тараса Шевченка», Україна
Громадська організація «Науково-дослідний центр Незалежна експертиза»,
Україна
natomen@gmail.com, anna.brailko@gmail.com

Метою статті є дослідження особливостей світового та європейського ринків взуття та визначення умов доведення відповідності взуття, виготовленого в Україні, вимогам чинних регламентів та директив ЄС. У контексті гармонізації технічного регулювання між Україною та ЄС відповідність продукції встановленим вимогам ЄС набуває особливої важливості для ефективної інтеграції у спільний ринок, зокрема з огляду на вимоги до якості та безпечності.

Ключові слова: *взуття, безпечність, суттєві вимоги, доведення відповідності, технічна документація, маркування.*

В умовах стрімкої зміни ринкових вимог та жорсткої конкуренції вирішальними факторами успіху компанії стають безпечність та якість продукції. Гармонізоване управління якістю та безпечністю взуття передбачає системний підхід до контролю та забезпечення відповідності взуття встановленим нормам і стандартам. Це означає, що виробництво, відбір матеріалів і тестування продукції відбуваються за єдиними правилами та вимогами, які однакові для різних ринків, що полегшує торгівлю та захищає споживачів. Основні аспекти гармонізованого управління зосереджені на: єдиних нормах і стандартах: системному контролю, який охоплює всі етапи виготовлення взуття – від вибору сировини до готового виробу; оцінці безпечності (зокрема, відсутності хімічних речовин, які можуть викликати алергію або іншим чином шкодити здоров'ю; запобіганні травм під час носіння тощо); маркуванні та інформації для споживачів і їх захисті. Необхідність доведення відповідності українського взуття європейським нормам продиктована стратегічною зацікавленістю українських виробників у диверсифікації експортних напрямків, посиленні конкурентних позицій на ринку Європейського Союзу (далі за текстом – ЄС) і стимулюванні довгострокового економічного розвитку країни.

Метою статті є дослідження особливостей світового та європейського ринків взуття та визначення умов доведення відповідності взуття, виготовленого в Україні, вимогам чинних регламентів та директив ЄС. Об'єктом дослідження обрано взуття, предметом – ринок взуття, управління якістю та безпечністю взуття на ринку ЄС. Під час проведення

досліджень застосовано наступні методи – аналітичний, систематизації, порівняння, узагальнення.

З огляду на загальну чисельність населення світу, очікується, що у 2025 році середній дохід на одну особу на світовому ринку взуття становитиме 64,07 долара США. За прогнозами, до 2030 року загальний обсяг ринку сягне 18,9 мільярда пар взуття, а у 2026 році передбачається зростання на 4,2% [1]. У 2025 році середній показник споживання взуття на одну людину становитиме приблизно 2,01 пари. І якщо європейський ринок взуття у 2024 році оцінювався в 90,8 мільярда доларів США, то прогнозується, що до 2033 року він зросте до 119,0 мільярда доларів, демонструючи середньорічне зростання (CAGR) на рівні 3% у період з 2025 по 2033 роки. Лідерами у сегменті екологічного взуття завдяки впровадженню інноваційних матеріалів і сталих виробничих технологій залишатимуться Італія та Іспанія [1; 2; 3]. Враховуючи, що щорічне споживання взуття в Європі становить близько 2,5 мільярда пар, з яких 2,2 мільярда – імпортовані, Україна має значний потенціал для освоєння частки європейського ринку [4].

Сприятливі тенденції розвитку світового та європейського ринку взуття, для українських виробників відкриваються перспективні можливості для виходу на міжнародні ринки, насамперед – на ринок Європи [5]. Сучасний ринок взуття зі шкіри в Україні також перебуває під впливом екологічних і сталих трендів. Все більшої популярності набуває виробництво взуття з екологічно безпечних матеріалів, використання сировини, отриманої шляхом переробки, а також створення якісних і довговічних моделей, що відповідають принципам сталого розвитку [6]. Для збереження конкурентоспроможності українським виробникам взуття необхідно адаптувати свої стратегії до сучасних умов, вдосконалювати виробничі процеси, приймати зважені управлінські рішення для покращення ефективності бізнесу. Важливо також постійно аналізувати ринкові тенденції, рівень попиту, вивчати потреби споживачів і проводити оцінку конкурентного середовища на потенційних ринках збуту. Для підвищення конкурентоспроможності українського взуття на ринку ЄС варто враховувати такі актуальні тенденції: зростання попиту на взуття для активного відпочинку та спортивних занять; орієнтація споживачів на екологічно чисту (сталу) продукцію; забезпечення індивідуального підходу та персоналізації виробів; пропозиція інклюзивних розмірів і різноманітних моделей; впровадження цифрових технологій і доповненої реальності; популяризація спадщини та повернення до ретро-стилю; використання моделі Direct-to-Consumer (DTC) на базі цифрових рішень [7]; підвищення обізнаності споживачів щодо здоров'я та благополуччя; застосування інноваційних матеріалів і технологій у виробництві взуття; зростання частки електронної комерції; посилення конкуренції з боку альтернативних видів взуття; збільшення попиту на взуття преміум-класу; задоволення потреб людей старшого віку, які ведуть активний спосіб життя, у зв'язку зі старінням населення. Поєднання одного або декількох із

цих трендів значно підвищить конкурентоспроможність українського взуття на ринках ЄС [5].

Військова агресія, перебої в енергопостачанні, трансформації на зовнішніх ринках ускладнюють виробництво взуття, шкіри та комплектуючих. Водночас, навіть у складних умовах воєнного часу галузь демонструє стійкість, здатність до оперативної адаптації, освоєння нових напрямів виробництва, релокації підприємств, відновлення діяльності на звільнених територіях, організації навчання й перекваліфікації кадрів, а також працевлаштування населення, зокрема внутрішньо переміщених осіб [8]. Попри складну ситуацію, в якій наразі перебуває вітчизняна взуттєва галузь, варто відзначити її конкурентні переваги в таких ключових аспектах: доступна ціна, оперативне виконання замовлень і висока якість продукції [4]. Сучасне українське взуттєве виробництво відзначається широким стилістичним розмаїттям – від класичних і вишуканих моделей до креативних і авангардних рішень. Сучасні українські дизайнери та майстри шкіряного взуття вкладають у свою роботу креативність і прагнення вивести українську продукцію на міжнародний рівень, доводячи, що вона може бути не лише носієм національної ідентичності, а й відповідати високим стандартам якості та моди [6]. Для досягнення високих стандартів якості особливий акцент робиться на вдосконаленні виробничих процесів. З цією метою впроваджуються потокові лінії з використанням обладнання провідних машинобудівних компаній з Німеччини, Чехії, Словаччини, Австрії та Італії. Це дає змогу випускати взуття, що відповідає європейським стандартам якості, відзначається сучасним дизайном та високою зносостійкістю [9]. Високий рівень якості продукції у взуттєвій галузі досягається також завдяки впровадженню сучасних технологій, суттєвій модернізації обладнання, перегляду виробничих підходів та активній співпраці з іноземними фахівцями. У процесі цієї взаємодії українські виробники переймають європейський досвід і впроваджують інноваційні технології у власне виробництво, залишаючи розробку дизайну у компетенції вітчизняних спеціалістів [10].

Управління якістю та безпечністю взуття здійснюється шляхом доведення його відповідності встановленим вимогам ЄС і включає:

а) з'ясування суттєвих вимог до продукції (визначення діючих директив і регламентів, які застосовуються до взуття);

б) оцінка безпечності (проведення аналізу характеристик взуття на основі ризику на предмет відповідності суттєвим вимогам);

в) формування пакету документів, що підтверджує відповідність (підготовка технічної документації; здійснення контролю виробництва; розробка інструкцій з використання, догляду та утилізації; формування вимог до маркування взуття);

г) дотримання вимог до пакування взуття [11].

Для з'ясування суттєвих вимог, яким повинно відповідати взуття доцільно визначити чинні директиви та/або регламенти, які застосовуються до конкретного виду взуття, шляхом перегляду кожної групи потенційних вимог. Директиви та технічні регламенти встановлюють вимоги до споживчих властивостей і характеристик окремих категорій продукції, а не до конкретних їх видів. Вони визначають цільові результати, які необхідно досягти — наприклад, вимоги до конструкції, маркування, інструкцій з використання тощо. Основна увага приділяється потенційним ризикам, які слід враховувати (таким як необроблені поверхні, гострі краї, наявність обмежено дозволених або заборонених речовин тощо). Водночас такі документи не містять конкретних технічних рішень щодо того, як саме слід забезпечити відповідність цим вимогам. Варто зазначити, що на відміну від директив, які потребують впровадження у національне законодавство кожної країни-члена ЄС, технічний регламент має пряму дію на всій території ЄС. Це забезпечує уніфіковане застосування вимог, зокрема щодо взуттєвої продукції, у всіх державах-членах.

Сформований перелік нормативно-правових актів необхідно аналізувати починати зі сфери застосування, а потім встановлювати суттєві вимоги, дотримання яких вимагає законодавство ЄС, а також з'ясувати можливі способи і методи доведення відповідності.

Оцінка безпечності охоплює аналіз системи внутрішнього контролю якості на виробництві та оцінку потенційних ризиків, пов'язаних з експлуатацією взуття. Етап внутрішнього контролю передбачає всебічну перевірку вхідної сировини, зокрема на відповідність вимогам Регламенту (ЄС) № 1907/2006 (REACH) [12], що регулює реєстрацію, оцінку, авторизацію та обмеження використання хімічних речовин. Перевірка охоплює всі складові взуття – шкіру, текстильні матеріали, клеї, барвники, гумові заготовки тощо. Разом з товаросупровідними документами виробник має отримати паспорти безпеки на відповідні компоненти та переконатися, що всі матеріали відповідають вимогам щодо хімічної безпеки. Це підтверджується протоколами лабораторій, які засвідчують відсутність або допустимі рівні заборонених чи обмежених речовин, таких як фталати (DEHP, DBP, BBP), ароматичні аміни, важкі метали (свинець, кадмій, нікель), формальдегід тощо. У випадку, якщо упаковка також підпадає під дію вимог з хімічної безпеки, необхідно надати відповідну документацію на пакувальні матеріали. Особливе значення має підтвердження того, що протягом усього виробничого процесу здійснюється систематичний контроль якості, який включає проміжні перевірки та контроль на всіх технологічних етапах: перевірку міцності з'єднання елементів взуття, надійність кріплення фурнітури, застібок тощо. Весь процес має бути задокументований відповідно до впровадженої на підприємстві системи управління якістю, із зазначенням відповідальної особи, наявністю звітної документації, записів перевірок тощо.

Після завершення оцінки ризиків [13] виробник зобов'язаний

підготувати технічну документацію, яка є обов'язковою умовою для експорту продукції до ЄС. Такий технічний файл може бути представлений як окремий документ або як набір документів. Обсяг і зміст наданої інформації мають відповідати складності виробу та рівню потенційних ризиків, визначених виробником. Технічна документація повинна охоплювати всі етапи виробничого процесу – від отримання сировини та її контролю до виробництва і перевірки якості на кожному етапі. Також слід включити технічні характеристики взуття: креслення, асортимент, артикули, моделі, типи тощо. Особливу увагу слід приділити загальному опису продукції, інформації, необхідній для оцінки її безпечності, а також аналізу ризиків та опису заходів, вжитих для їх усунення або мінімізації. Технічна документація має бути доступною з моменту введення продукції в обіг, незалежно від країни походження або місця виробництва взуття. Виробник зобов'язаний зберігати її протягом 10 років з дати розміщення продукції на ринку [14].

Важливим елементом доведення відповідності є нанесення належного маркування безпосередньо на взуття, а також, на упаковку. Відомості про правила використання, догляду та утилізації взуття зазвичай не наносяться безпосередньо на сам виріб, але можуть бути розміщені на етикетці або упаковці, а також продубльовані в технічній документації. Інформація щодо безпечного використання продукції має бути подана мовою, зрозумілою споживачам у країні, для якої призначена продукція.

Виробникам українського взуття слід приділяти особливу увагу дотриманню вимог ЄС щодо пакування продукції, що постачається на ринок ЄС. З огляду на прагнення України гармонізувати своє законодавство з європейськими нормами, Регламент (ЄС) № 2025/40 “Про упаковку та відходи упаковки” (PPWR) [15] має стати основним орієнтиром для оновлення національного регулювання у сфері поводження з пакуванням та його відходами. При експорті своєї продукції українські виробники повинні враховувати положення PPWR, які стосуються перероблюваності упаковки, запобігання надмірному пакуванню, належного маркування, використання вторинних матеріалів у виробництві пакування, а також вимог щодо звітності в рамках Розширеної відповідальності виробника (EPR – Extended Producer Responsibility). **Розширена відповідальність виробника (EPR)** – це підхід, що покладає на виробників відповідальність за екологічні наслідки своєї продукції протягом усього її життєвого циклу, з особливим акцентом на поводження з відходами, їх переробку та утилізацію. У випадку, якщо виробник реалізує взуття безпосередньо кінцевим споживачам або підприємствам на території ЄС, він зобов'язаний виконати низку вимог у рамках системи EPR, зокрема: **зарєєструватися в системі EPR** країни, до якої здійснюється експорт продукції; **сплачувати екологічні внески** відповідно до принципу “забруднювач платить”: чим екологічніше пакування, тим нижчий розмір платежів. Внески покривають витрати на збір, сортування та переробку відходів упаковки; **фінансувати інформаційні кампанії** для

споживачів та забезпечити адміністративне супроводження своєї участі в системі EPR; дотримуватися *гармонізованих на рівні ЄС вимог до EPR для упаковки*, що дозволяє уникнути правових розбіжностей між країнами-членами; *звітувати про обсяги упаковки*, яка виводиться на ринок разом із продукцією, із зазначенням її типу, кількості, частоти звітування, а також походження та подальшої обробки. У разі відсутності реєстрації виробника в ЄС, необхідно *призначити уповноваженого представника (Authorized Representative)* в одній з країн-членів ЄС. Така особа буде нести відповідальність за виконання обов'язків у системі EPR, забезпечувати взаємодію з наглядовими органами та подавати звітність. Також виробник може *делегувати ці обов'язки імпортеру*, який бере на себе відповідальність за відповідність продукції вимогам ЄС, реєстрацію в EPR та сплату екологічних зборів. Крім того, при постачанні продукції в упаковці, виробник зобов'язаний забезпечити **нанесення обов'язкового маркування**, зокрема: *позначення типу пакувального матеріалу* (наприклад, PAP 20 для гофрокартону, LDPE 4 – для поліетилену низької щільності); *екологічні знаки* – «recyclable» (підлягає переробці) або “do not litter” (не викидати будь-де); *ідентифікацію виробника* на пакуванні.

Висновки. Динамічний розвиток індустрії моди, зростання обізнаності населення щодо здорового способу життя, безперервний прогрес у виробництві матеріалів, підвищення рівня доходів, активне розширення електронної торгівлі, популяризація активного стилю життя (у тому числі серед старшого покоління), а також високий попит на преміальне та індивідуально виготовлене взуття – усі ці чинники сприяють сталому зростанню взуттєвого ринку.

Розвиток взуттєвої промисловості України відкриває нові можливості для розширення експортного потенціалу, зокрема завдяки впровадженню екологічно безпечних технологій, використанню відновлюваних ресурсів та перероблених матеріалів, що сприяє зниженню екологічного навантаження. Інновації в дизайні та виробничих процесах – зокрема впровадження 3D-друку та використання “розумних” матеріалів – стимулюють розвиток галузі, розширюючи функціональні та естетичні властивості взуттєвої продукції. Українські виробники мають високий потенціал для просування національних брендів на світовому ринку та досягнення міжнародного визнання.

Гармонізоване управління якістю та безпечністю взуття сприяє розвитку взуттєвого бізнесу, захищає споживача, підвищує конкурентоспроможність української продукції на міжнародному ринку та може бути реалізоване шляхом: визначення суттєвих вимог та процедур доведення відповідності, що застосовуються до конкретних видів взуття; здійснення оцінки безпечності взуття шляхом аналізування його характеристик на основі ризиків у співвідношенні з суттєвими вимогами; підготовці технічної документації, що підтверджує відповідність взуття встановленим вимогам ЄС та нанесення обов'язкового маркування на взутті та упаковці.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Footwear-Worldwide // Consumer / Statista Market Forecast. URL: <https://www.statista.com/outlook/cmo/footwear/worldwide>
2. Europe Footwear Market Report by Product (Non-Athletic Footwear, Athletic Footwear), Material (Rubber, Leather, Plastic, Fabric, and Others), Distribution Channel (Footwear Specialists, Supermarkets and Hypermarkets, Departmental Stores, Clothing Stores, Online Sales, and Others), Pricing (Premium, Mass), End User (Men, Women, Kids), and Country 2025-2033 // Europe Footwear Market / imarcgroup. URL: <https://www.imarcgroup.com/europe-footwear-market>
3. Europe Footwear Market to Grow at 3% During 2025-2033, Spurred by Growing Consumer Inclination Toward Premium Products // Europe Footwear Market / imarcgroup. URL: <https://www.imarcgroup.com/europe-footwear-market-report>
4. Серебряк, К. І., Белоусов, Я. І. Просторовий аналіз розвитку легкої промисловості. *Академічні візії*. 2024. Вип. 33. С. 1–9. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.13268809>
5. Омельченко Н. В., Браїлко А. С., Снігур А. О. Визначення потенційних ринків країн ЄС для експорту взуття українського виробництва. *Підприємництво і торгівля*. 2025. № 44. С. 137-151. DOI: <https://doi.org/10.32782/2522-1256-2025-44-17>
6. Історія шкіряного взуття в Україні: традиції і сучасність // Блог / KORI. URL: https://kori.com.ua/blog/history_of_leather_shoes_in_Ukraine
7. Bothare V. Global Footwear Market: Information by Type (Athletic, Non-Athletic), End-User (Men, Women, Children), and By Region (North America, Europe, APAC, Middle East and Africa, LATAM) Forecasts, 2025-2033 // Consumer Products // Straits Research. URL: <https://straitsresearch.com/report/footwear-market>
8. Стан легкої промисловості в Україні; виклики та перспективи // Аналітика та дослідження / Kyivstar Business Hub. URL: <https://hub.kyivstar.ua/articles/stan-legkoji-promislovosti-v-ukrayini-vikliki-ta-perspektivi>
9. Про компанію “ТАЛАН” – фабрика та інтернет-магазин спецвзуття // Talan. URL: <https://talan.ua/uk/about-us>
10. Що змінилося у вітчизняній взуттєвій індустрії в останні роки // Блог / TheoLeo. URL: https://theoleo.com.ua/ua/blog/shcho-zminylosya-u-vitchyznyaniy-vzutteviy-industriyi-za-ostani-roky/?srsltid=AfmBOoqGTmPyLgRKzbb9ksWnsjwVm_cCVxOI4Q6zH1ZvIF1JjjVb5Vhc
11. Омельченко Н. В., Снігур А. О., Браїлко А. С. Особливості доведення відповідності взуття вимогам ЄС. *Цифрова економіка та економічна безпека*. 2025. № 3 (18). С. 95–104. DOI: <https://doi.org/10.32782/dees.18-15>
12. Concerning the Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals (REACH), establishing a European Chemicals Agency, amending Directive 1999/45/EC and repealing Council Regulation (EEC) No 793/93 and Commission Regulation (EC) No 1488/94 as well as Council Directive 76/769/EEC and Commission Directives 91/155/EEC, 93/67/EEC, 93/105/EC and 2000/21/EC: Regulation (EC) of the European Parliament and of the Council of 18 December 2006 № 1907/2006 // EUR-Lex home / European Union. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A02006R1907-20250422>
13. Снігур А. О., Омельченко Н. В., Браїлко А. С. Розробка алгоритму оцінки ризиків дитячого взуття як етапу доведення відповідності вимогам безпечності в ЄС. *Вісник Львівського торговельно-економічного університету. Економічні науки*. 2025. № 82. С. 89–104. DOI: <https://doi.org/10.32782/2522-1205-2025-82-13>

14. On general product safety, amending Regulation (EU) No 1025/2012 of the European Parliament and of the Council and Directive (EU) 2020/1828 of the European Parliament and of the Council, and repealing Directive 2001/95/EC of the European Parliament and of the Council and Council Directive 87/357/EEC: Regulation (EU) of the European Parliament and of the Council of 10 May 2023 № 2023/988 // EUR-Lex home / European Union. URL: <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2023/988/oj/eng>

15. On packaging and packaging waste, amending Regulation (EU) 2019/1020 and Directive (EU) 2019/904, and repealing Directive 94/62/EC: Regulation (EU) of the European Parliament and of the Council of 19 December 2024 № 2025/40 // EUR-Lex home / European Union. URL: <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2025/40/oj/eng>

3.9 ФОРМУВАННЯ РЕЖИМУ ЗРОШЕННЯ БАГАТОРІЧНИХ ПЛОДОВИХ НАСАДЖЕНЬ В УМОВАХ ЗМІНИ КЛІМАТУ

**Шемякін М. В., Кисельов Ю. О., Рудий Р. М., Боровик П. М.,
Удовенко І. О., Прокопенко Н. А.**

Уманський національний університет, Україна
misha.uman@gmail.com

Зростання середньодобових температур та частоти екстремально жарких періодів за відсутності відповідного збільшення кількості атмосферних опадів обумовлює погіршення умов ведення аграрного виробництва, спричиняючи ґрунтову та атмосферну посуху. Найефективнішим методом протидії такому явищу є штучне регулювання водного режиму ґрунту шляхом зрошення.

Для плодкових культур найбільш раціональним визнано режим перемінного водозабезпечення, який передбачає підтримання вологості ґрунтового середовища на рівні не нижче 80 % найменшої вологоємності у початковій фазі вегетації та не менше 70 % – у завершальній. Реалізація такого водозберігаючого підходу у поєднанні з мульчуванням пристовбурних площ забезпечує урожайність близько 30,8 т/га при економії орієнтовно 62 % поливної води. Загальний обсяг водоспоживання становить 220 м³/га.

Застосування обмеженого за ресурсами (дефіцитного) зрошення, при якому порогове значення ґрунтової вологості перед поливом становить 70 % найменшої вологоємності та доповнюється мульчуванням пристовбурних смуг, дозволяє досягати урожайності на рівні 27,2 т/га з високою ефективністю використання води. Разом з тим впровадження такого режиму потребує ретельного економічного аналізу у контексті конкретних виробничих умов.

Внесок водозабезпечення у формування продуктивності яблуневих насаджень є визначальним і сягає 71-73 %. Водночас вплив мульчування становить 8–10 % у роки з достатнім або помірним зволоженням, тоді як у періоди різко вираженої посухи його значення зменшується до приблизно 2 %.

Ключові слова: *посуха, режим зрошення, передполивна вологість ґрунту, використання поливної води*

Метою дослідження було визначення закономірностей впливу різних режимів зрошення на ефективність використання поливної води та продуктивність багаторічних плодкових культур за умов підвищеної аридизації клімату. Об'єктом дослідження виступали режими зрошення багаторічних насаджень, предметом – динаміка ґрунтової вологи у процесі зрошення. У дослідженні застосовано аналітичні, експертно-оцінювальні, порівняльні та експериментальні методи.

Кліматичні тенденції та їх вплив на агровиробництво. Результати багаторічних спостережень засвідчують, що посухи, які охоплюють понад половину території держави, у минулому виникали приблизно раз на десятиріччя, проте в останні 30 років відзначаються майже щорічно, у тому числі в регіонах, де раніше не фіксувалися. У період 1981–2020 рр. лише 1993 та 1997 роки були винятком щодо відсутності посушливих явищ.

За даними Українського гідрометцентру, середньорічна температура повітря на території України за останні три десятиліття зросла на 1,2 °С. Темп підвищення температури у 1975-2019 рр. становив 0,61-0,82 °С на 10 років, що суттєво перевищує аналогічні показники для Північної півкулі (0,34 °С) та Європи (0,47 °С). Збільшення числа днів із температурою понад 35–40 °С та підвищення абсолютних максимумів призвели до суттєвого зростання теплових ресурсів за умов майже незмінної кількості опадів.

Водний дефіцит на тлі кліматичного потепління зумовлює погіршення природного режиму зволоження ґрунтів, що негативно відбивається на аграрному секторі, який забезпечує 12-14 % ВВП та близько 40 % валютних надходжень від експорту.

Трансформація зон зволоження та потреби у зрошенні. З 1991 року площа сухих і дуже сухих зон зросла на 7 % і нині охоплює близько третини території держави, зокрема 11,6 млн га ріллі. Площа земель з достатнім атмосферним зволоженням зменшилася до 7,6 млн га. За сучасних кліматичних умов близько 19 млн га орних земель потребують систематичного штучного зволоження, а 4,8 млн га – регулювання водного режиму.

Збереження нинішніх темпів зміни клімату неминуче спричинить подальше поширення посух і, відповідно, зниження продуктивності агроландшафтів. Найбільш дієвим способом компенсації нестачі вологи є зрошення [3, 7, 8, 9, 12, 13].

Технології зрошення. У сучасній практиці найбільше застосовуються системи дощування та краплинного поливу. Дощування використовують переважно на польових культурах. Воно забезпечує механізацію та автоматизацію процесу, можливість охоплення значних площ. Водночас відзначається висока матеріаломісткість, а також підвищений ризик розвитку хвороб через вологість листової поверхні [1, 11, 13].

Краплинне зрошення характеризується локальною подачею води у прикореневу зону. Серед основних переваг – раціональне використання води, можливість фертигації, скорочення втрат вологи через випаровування та зниження фітопатологічного тиску. Обмежувальними факторами є значні капітальні витрати та високі вимоги до якості поливної води [1, 11, 13, 14].

Формування режиму зрошення та екологічні аспекти. Режим зрошення охоплює встановлення поливної норми, строків і кратності поливів, що забезпечує підтримання визначеного рівня вологозапасів у кореневмісному шарі ґрунту відповідно до біологічних особливостей культур.

Втім, надмірне або неправильно організоване зрошення може спричинити агроекологічні дисбаланси: зміну процесів ґрунтоутворення,

деградацію структури ґрунту, зменшення вмісту гумусу, трансформацію біоти ґрунтового середовища.

За даними Інституту водних проблем і меліорації НААН, оптимальний сумарний прихід вологи (опаді + поливна вода), що забезпечує стабільний водний баланс у період вегетації, становить 500-600 мм [5, 6, 10]. Для важкосуглинкових ґрунтів з глибиною активного шару 0,4 м і добовим водоспоживанням понад 3 мм гранично допустимі екологічно безпечні поливні норми не повинні перевищувати 350 м³/га (табл.).

Таблиця. Гранично допустимі значення оптимальних екологічно безпечних поливних норм (м³/га) залежно від інтенсивності водоспоживання [5]

Потужність активного шару ґрунту, м	Добова інтенсивність водоспоживання E, мм, для ґрунтів							
	менш є 3	більше 3	менше 2	2-4	більше 4	менше 2	2-4	більше 4
	глини, важкі суглинки		середні суглинки			легкі суглинки, супіски		
0,3	200	300	200	200	300	200	200	250
0,5	300	400	300	300	400	200	300	300
0,7	400	500	300	400	450	300	350	400
0,9	500	600	400	500	600	400	400	450

Підходи до формування режимів зрошення. У сучасній системі зрошуваного землеробства режими штучного зволоження формуються з урахуванням доступності водних ресурсів, технічного оснащення та економічних можливостей господарств. Існує декілька науково обґрунтованих підходів, що різняться за рівнем забезпечення вологою, екологічними наслідками та ефективністю водоспоживання.

1. Біологічно оптимальні режими. Класичний підхід передбачає підтримання вологості ґрунту у межах, максимально наближених до фізіологічної потреби культур протягом усього періоду вегетації. Умовою його реалізації є достатній запас води та фінансові ресурси, що дають змогу формувати максимально продуктивні агроценози. Водночас надлишкове водонасичення ґрунту у таких системах може провокувати негативні ґрунтові та екологічні процеси – вторинне перезволоження, порушення повітряного режиму, вимивання елементів живлення [5, 6].

2. Компенсаційні (еколого-раціональні) режими. Цей підхід розглядає полив як доповнення до атмосферних опадів з метою відновлення запасу вологи, витраченої на транспірацію та випаровування. Основою є узгодження поливної норми з екологічним станом ґрунту та водного середовища. Науковцями Інституту водних проблем і меліорації НААН розроблено методики, що регламентують: глибину вологоутримувального шару ґрунту; допустимі рівні вологості до поливу; екологічно безпечні межі поливної норми [5].

Такі схеми зрошення дають змогу уникати проникнення води за межі кореневої зони та мінімізувати ризик деградації ґрунтів.

3. Водощадливі режими. Цей підхід базується на диференційованому зволоженні у залежності від фаз розвитку рослин: інтенсивне вологозабезпечення у періоди критичної чутливості до водного дефіциту та обмежене – в інші фази. Це дозволяє зменшити водоспоживання без істотної втрати врожайності [4, 5]. Ефективним доповненням є технології обмеження випаровування вологи з ґрунту, зокрема мульчування пристовбурних смуг у садах [16].

4. Дефіцитне зрошення. За цього варіанту рослини забезпечуються водою на рівні менш ніж 70 % від їх фізіологічної потреби. Урожайність у таких умовах знижується на 10–50 %, проте досягається суттєва економія води. Рішення про застосування цього підходу базується на співвідношенні затрат та прибутку [2].

Експериментальні дослідження у плодкових насадженнях. У дослідях на яблуні (підщепа М.9) Уманського національного університету встановлено, що найбільше водоспоживання припадає на фазу активного росту пагонів і плодів, тоді як у другій половині вегетації воно помітно знижується. Це стало підґрунтям для розроблення водощадного режиму, суміщеного з технологіями зниження непродуктивних втрат води.

У досліді поєднували два способи утримання ґрунту в пристовбурних смугах – гербіцидний пар і мульчування – та три передполивні пороги вологості: 80 % найменшої вологоємності (НВ); 80 % НВ у першій половині вегетації та 70 % НВ – у другій; 70 % НВ на всьому відрізку вегетації. Глибина зволоженого шару становила 0,4 м, а разова норма поливу – 35 л/дерево при 80 % НВ і 50 л/дерево – при 70 % НВ [15, 16].

Найбільш результативним виявився водощадний режим із забезпеченням 80 % НВ до середини вегетації та 70 % НВ у її другій частині в поєднанні з мульчуванням: урожайність – 30,8 т/га, економія води – 62 %, витрата води на додаткову тону продукції – 22,7 м³/т, загальна поливна норма – 220 м³/га.

Режим із постійним передполивним рівнем 70 % НВ також був ефективним (урожайність 27,2 т/га, водовитрати – 20,7 м³/т), проте його застосування доцільне лише після економічного обґрунтування [15, 16].

Вплив зрошення та способу утримання ґрунту на врожайність. Статистична обробка показала, що зрошення є визначальним фактором формування врожаю яблуні – його значимість досягає 73 % у вологих і сухих роках та 71 % у роки гострої посухи. Вплив способу утримання ґрунту в садах є значно нижчим: 8 % – у вологий рік, 10 % – за умов недостатніх опадів, лише 2 % – у період гострого дефіциту вологи, коли вирішальним чинником залишається саме зрошення [15, 16].

Висновки. Зростання інтенсивності кліматичних змін та пов'язане з ним скорочення придатних для господарського використання водних запасів істотно ускладнюють умови функціонування аграрного виробництва. Найефективнішим способом протидії ґрунтовій і атмосферній посусі вважається штучне зволоження агроландшафтів. Зокрема, краплинне зрошення забезпечує ощадливе використання водних

ресурсів, можливість автоматизованого контролю подачі води та оптимальний водно-повітряний режим ґрунту, що сприяє інтенсивному росту та розвитку культурних рослин.

Для плодкових насаджень найбільш результативним визначено перемінний (водоощадливий) режим вологозабезпечення, за якого у першій фазі вегетації вологість ґрунту підтримується не нижче 80 % найменшої вологоємності (НВ), а в другій — не менше ніж 70 % НВ. Поєднання такого підходу із мульчуванням пристовбурних ділянок забезпечує урожайність на рівні 30,8 т/га та дозволяє скоротити витрати зрошувальної води на 62 %, за зрошувальної норми 220 м³/га. Застосування дефіцитного водного режиму – зі зниженням порогового рівня вологості ґрунту до 70 % НВ до початку поливу – у поєднанні з мульчею дає змогу отримати урожайність 27,2 т/га за високої водозберігаючої ефективності. Водночас впровадження такого режиму зрошення потребує економічного аналізу з урахуванням конкретних виробничих умов.

Внесок зрошення у формування врожайності яблуні є визначальним – на рівні 71-73 %. Частка впливу мульчування становить 8-10 % в умовах достатньої та помірної кількості опадів у вегетаційний період, тоді як у роки з різко вираженою посухою вона зменшується до 2 %.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Дощ чи крапля: що зверне аграрію та скільки коштує зрошення. Джерело: Agravery.com. URL: <https://agravery.com/uk/posts/show/dos-ci-krapla-so-obrati-agrariu-ta-skilki-kostue-zrosenna> (дата звернення 24.10.2025 р.).
2. Жовтоног О. І., Поліщук В. В. Особливості розрахунку динаміки вологості ґрунту в умовах неоптимального зволоження // Меліорація і водне господарство: міжвідомч. Тематич. Наук. Зб. 2003. №89. С. 9-18.
3. Концептуальні основи плану управління посухами в Україні / Яцюк М.В. та ін. Київ, 2021. 44 с.
4. Писаренко В.А. Методичні підходи до формування водозберігаючих режимів зрошення культур у степовому регіоні // Наукові основи землеробства в умовах недостатнього зволоження: матеріали наук.-практ. Конф. (21-23 лютого 2000 р.) К.: Аграрна наука, 2001. С. 181-189.
5. Режим зрошення / Сучасний стан, основні проблеми водних меліорацій та шляхи їх вирішення. К.: Аграрна наука, 2001. С. 100-105.
6. Режими і способи зрошення / Наукові основи охорони та раціонального використання зрошуваних земель України. За наук. Ред. С.А. Балюка, М.І. Ромащенко. К.: Аграрна наука, 2009. С. 313-350.
7. Розвиток інтенсивних систем землеробства на зрошуваних землях України: науково-технологічне забезпечення : методичні рекомендації. За ред. Р.А. Вожегової. Херсон: «ОЛДІ-ПЛЮС», 2020. 254 с.
8. Ромащенко М.І., Гусев Ю.В., Шатковський А.П., Сайдак Р.В., Яцюк М.В., Шевченко А.М., Матяш Т.В. Вплив сучасних кліматичних змін на водні ресурси та сільськогосподарське виробництво // Меліорація і водне господарство. 2020. №2. С.5-22. DOI: <https://doi.org/10.31073/mivg202001-235>
9. Ромащенко М. І., Дехтяр О. О., Гусев Ю.В., Яцюк М. В., Сайдак Р.В., Матяш Т. В., Шатковський А.П., Воропай Г.В., Войтович І.В., Музика О.П. Усатий

С.В. Проблеми та основні напрями розвитку зрошення та дренажу в Україні в умовах змін клімату // Меліорація і водне господарство. 2020. №2. С. 56-67. DOI: <https://doi.org/10.31073/mivg202001-233>

10. Ромащенко М.І., Жовтоног О.І., Філіпенко Л.А. Обґрунтування екологічно безпечних поливних норм // Вісник аграрної науки. 1999. №11. С. 53-58.

11. Ромащенко М.І., Сайдак Р.В., Матяш Т.В., Яцюк М.В. Ефективність зрошення залежно від вартості води // Меліорація і водне господарство. 2021. № 2. С. 150-159. DOI: <https://doi.org/10.31073/mivg202102-308>

12. Ромащенко М.І., Яцюк М.В., Шевчук С.А., Шевченко А.М., Даниленко Ю.Ю., Матяш Т.В., Сидоренко О.О. Водна безпека – запорука сталого розвитку України // Вісник аграрної науки. 2018. №11 (788). С. 177-185.

13. Система зрошувального землеробства в Україні: проблеми, вартість та шляхи вирішення. URL: <https://landlord.ua/news/systema-zroshuvalnoho-zemlerobstva-v-ukraini-problemy-vartist-ta-shliakhy-vyrishennia/> (дата звернення 24.10.2025 р.).

14. Шатковський А.П., Журавльов О.В. Наукові основи технологій краплинного зрошення сільськогосподарських культур. Ромащенко М.І. К.: ІВПіМ НААН,, 2021. – 405 с.

15. Шемякін М. В., Кирилюк В. П. Складові водоощадливого режиму зрошення інтенсивних насаджень яблуні за краплинного способу поливу. Вісник Уманського національного університету садівництва. 2017. № 1. С. 82-89.

16. Шемякін М. В. Вплив мульчування пристовбурних смуг в інтенсивних яблуневих садах на врожайність та ефективність використання поливної води. Вісник Уманського національного університету садівництва. 2014. № 1. С. 35-40.

3.10 СУЧАСНІ ТЕХНОЛОГІЇ ВИРОБНИЦТВА БІОГАЗУ

Фалєєв Ф. Р.

Науковий парк «Алгоритм інновацій»
fedyu.faleev2004@gmail.com

У статті проведено комплексний аналіз сучасних технологій вилучення біогазу, включаючи анаеробне зброджування та газифікацію біомаси. Розглянуто їх технічні, екологічні та економічні особливості, а також інтеграцію в енергетичну систему. Особлива увага приділяється потенціалу біогазу з відходів та перспективам виробництва біогазу як заміника природного газу. Проаналізовано переваги та обмеження різних технологічних підходів, включаючи вимоги до обладнання. Акцент зроблено на можливостях та недоліках різних технологій виробництва біогазу та їх порівнянні.

Ключові слова: біогаз, анаеробне зброджування, газифікація, відновлювана енергія, відходи.

Огляд попередніх досліджень. Оптимізації анаеробного зброджування було присвячено ряд міжнародних досліджень, включаючи його кінетику, математичне моделювання та біохімічні шляхи метаногенезу [1]. Сучасні огляди підкреслюють роль параметрів підкладки, часу утримування та температури у формуванні виходу біогазу.

Суше анаеробне зброджування розглядається як ресурсозберігальна альтернатива традиційному методу при переробці твердих органічних відходів. Вчені визначають його переваги у зменшенні споживання води та зниженні вартості очищення стічних вод, але також підкреслюють проблеми рівномірності потоку та можливого підкислення субстрату [2].

Газифікація біомаси досліджується як термохімічний шлях перетворення складних органічних залишків у синтез-газ, що містить H та CO [3]. Поточна робота зосереджена на моделюванні процесів піролізу та реакцій відновлення, а також на видаленні розчиненого газу та сполук сірки.

Завдання. Провести системний аналіз існуючих технологій вилучення біогазу, виявити їх переваги, недоліки та умови ефективного застосування в сучасних реаліях, а також визначити сектору біогазової енергетики.

Мета. Метою аналізу є обґрунтування найбільш перспективних та технологічно ефективних методів отримання біогазу з різних видів органічної сировини з урахуванням екологічних, економічних та екологічних факторів.

Аналіз. Проблема енергетичної незалежності та сталого розвитку стає все більш актуальною для багатьох країн. Одним з найбільш перспективних напрямків є виробництво біогазу, тобто відновлюваного енергоносія, що отримується в результаті анаеробного розкладання органічних відходів. Біогазові технології дозволяють одночасно

вирішувати завдання утилізації відходів, скорочення викидів парникових газів і виробництва екологічно чистої енергії. У світовій практиці активно застосовуються різні методи видобутку біогазу, що відрізняються за сировинною базою, технологічними умовами та ефективністю.

Мокре анаеробне зброджування є найпоширенішою технологією виробництва біогазу. Процес заснований на розкладанні органічної речовини в рідкому або напіврідкому середовищі при температурі 35-55 °С. Як субстрати використовуються гній, харчові та сільськогосподарські відходи, стічні води. Основною перевагою технологій є стабільність процесу та високий вихід метану. До технологічних установок належать герметичні реактори – метантенки, обладнані системами опалення, змішування та газозбору. Мокре бродіння використовується на фермах і комунальних підприємствах, де постійний потік рідких відходів [4]. Недоліком є необхідність великих обсягів води та витрат на підтримання температурного режиму. Однак завдяки технологічним удосконаленням ця технологія залишається найбільш надійною та масштабованою.

Виходячи з характеру процесу бродіння та його технологічних характеристик, до метантенків висуваються такі вимоги: абсолютна герметичність стінок, запобігання газообміну, непроникність для рідин, підтримання статичної міцності під впливом власної ваги, надійна теплоізоляція, надійність завантаження та розвантаження [5].

Сухе анаеробне зброджування використовується для переробки твердих відходів з низькою вологістю. На відміну від вологого, немає необхідності розбавляти підкладку водою, що зменшує об'єм реактора та кількість стічних вод. Процес проводять при мезофільних або термофільних температурах, з періодичним перемішуванням маси. Сухе бродіння широко використовується в Європі для переробки рослинних залишків, силосу, соломи і твердих побутових відходів. Ця технологія характеризується компактними установками і меншими експлуатаційними витратами. Однак вихід біогазу може бути трохи нижчим, ніж у вологих системах. Комбіновані заводи, що поєднують обидва підходи, забезпечують більшу гнучкість у переробці різних типів відходів [6]. Таким чином, сухе анаеробне зброджування є одним з найпоширеніших методів виробництва біогазу.

Газифікація біомаси є однією з найбільш технологічно передових областей у виробництві біогазу. На відміну від біологічних методів, які покладаються на активність мікроорганізмів, газифікація є термохімічним процесом, заснованим на розкладанні органічних сполук при високих температурах і обмеженому доступі кисню. Складається переважно з водню, оксиду вуглецю, метану і невеликих кількостей вуглекислого газу і азоту. Залежно від типу реактора розрізняють флюїдизаційні, киплячі, псевдо-киплячі та фіксовані шари. Циркуляційні киплячі шарові установки вважаються найефективнішими, забезпечуючи рівномірний розподіл температури та високу конверсію біомаси [7]. Газифікація дозволяє

використовувати широкий спектр відходів – від деревини та сільськогосподарських відходів до осаду стічних вод.

Складність технології полягає в необхідності багатоступеневого очищення газу від накипу, частинок золи та сполук сірки, що вимагає використання фільтраційних та каталітичних систем. Крім того, капітальні витрати на будівництво установки газифікації в середньому вищі, ніж на анаеробну установку аналогічної потужності [7]. Однак для масштабних проектів ці інвестиції оплачуються високою гнучкістю технології, газ може використовуватися для виробництва тепла, електроенергії або хімікатів.

Виробництва біогазу з ділянок твердих побутових відходів та очисних споруд є одним з найважливіших напрямків циркулярної економіки, адже поєднує утилізацію відходів та виробництво енергії. У полігонах органічна фракція відходів природним чином розкладається в анаеробних умовах, утворюючи метан, вуглекислий газ і сліди газів [8]. Сучасні системи рекуперації газу включають свердловини, перфоровані труби, компресори та факели або генератори. Відновлений газ зазвичай містить значну кількість метану, CO та домішки. Раніше цей газ спалювали на факелах у більшості країн, щоб запобігти викиду метану, одного з найпотужніших парникових газів [9]. Сьогодні він активно використовується для виробництва електроенергії та тепла.

Економічна ефективність таких проектів залежить від складу і віку ділянки, щільності відходів і клімату. У Європі середній показник збору біогазу становить значну частину від теоретичного потенціалу. На великих звалищах, таких як Deponie Pohlsche Heide (Німеччина) або SITA Landfill (Нідерланди), видобутий газ забезпечує значну кількість електроенергії [9]. Такий підхід дозволяє забезпечити електроенергією велику кількість домогосподарств.

Аналіз показує, що біогазові технології можна розділити на біологічні (анаеробне зброджування) та термохімічні (газифікація). Кожна група має свої переваги, економічні та екологічні особливості. Мокре та сухе зброджування характеризується високим ступенем технологічної зрілості та легким накипом. Вони ідеально підходять для сільськогосподарських регіонів, де є доступ до органічної сировини та інфраструктури. Спільне перетравлення демонструє найвищу ефективність з точки зору виділення метану та адаптивності до зміни складу сировини. Його застосування дозволяє підвищити прибутковість проектів за рахунок зменшення нестабільності мікробіологічних процесів.

Газифікація, в свою чергу, забезпечує можливість переробки лігноцелюлозних і відходів. Він дає більш енергоємний продукт, придатний для хімічної конверсії. Однак через високу вартість обладнання та необхідність комплексного очищення газу його рентабельність проявляється лише у великих проектах [7]. При порівнянні технологій за екологічними критеріями анаеробне зброджування має мінімальний вплив на навколишнє середовище, оскільки відбувається при низьких

температурах та не супроводжується токсичними викидами. Газифікація вимагає контролю викидів CO та органічних смол.

Майбутнє біогазових технологій пов'язане з впровадженням автоматизованих систем управління, цифрового моніторингу процесів та інтеграції з сонячними та вітровими джерелами в межах енергетичних кластерів. Модернізація існуючих очисних споруд та створення муніципальних біогазових комплексів є перспективним напрямком.

Сучасний розвиток біогазової галузі спрямований не тільки на підвищення ефективності процесів, а й на цифровізацію та автоматизацію систем управління. Використання датчиків, систем моніторингу та технологій штучного інтелекту дозволяє в режимі реального часу та контролювати температуру, тиск і вміст метану, що знижує ризик аварій і оптимізує вихід газу [1]. Це дає змогу зрозуміти перспективність даної галузі.

Перспективним вважається також використання достадійного анаеробного зброджування, де відбувається гідроліз і метаногенез в окремих реакторах. Це підвищує загальну ефективність системи і знижує ризик інгібування метанових бактерій. Вже реалізуються пілотні проекти по закачуванню біометану в газотранспортну мережу та по створенню агропромислових електростанцій, які поєднують виробництво біогазу, електроенергії та тепла на базі однієї станції. Такі кластери формують основу для локальної енергетичної незалежності та розвитку економіки замкнутого циклу.

Висновки. Сучасні біогазові технології стають ключовим елементом глобальної енергетичної трансформації. Вони не просто забезпечують альтернативу викопним джерелам, а формують нову модель взаємодії людини з природою, де відходи стають ресурсом, а енергія – інструментом сталого розвитку. Біогазова енергетика поєднує досягнення біотехнології, інженерії та екології, створюючи систему, здатну одночасно вирішувати проблеми утилізації відходів, скорочення викидів та виробництва відновлюваної енергії. Анаеробна та газифікація біомаси демонструють високу технологічну зрілість і потенціал для масштабування в широкому діапазоні кліматичних та економічних умов. Майбутнє галузі пов'язане з інтеграцією інновацій, мембранних систем очищення, цифрового моніторингу, біоінженерних консорціумів мікроорганізмів і гібридних заводів, що поєднують біохімічні та термохімічні процеси. Такі технології значно підвищують ефективність, безпеку та екологічну чистоту енергетичних рішень. Біогаз – це не просто енергія, а символ переходу людства від моделі споживання до моделі циркулярної економіки, де кожна частина виробничого циклу має екологічне та соціальне значення. Це прокладає шлях для локальних енергетичних систем, які не залежать від зовнішніх факторів і стійкі до глобальних викликів.

Таким чином, на основі проведеного аналізу можна сказати, що розвиток біогазових технологій – це не тільки питання науки та техніки, а й вираження нової етики взаємодії суспільства і природи. Це крок до

цивілізації, де енергія народжується не за рахунок руйнування, а через оновлення і гармонію з живими процесами Землі.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Tabatabaei M. Biogas: Fundamentals, Process and Operation. Springer. 2018.
2. Wu G. Anaerobic Digestion: Fundamentals, Modelling, and Applications. Springer. 2024.
3. Basu P. Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction: Practical Design and Theory. Cambridge. Academic Press. 2018.
4. Akinna J. C. Anaerobic Waste-Wastewater Treatment and Biogas Plants: A Practical Handbook. London. 2019.
5. Любецький О. В. Технологія виробництва біогазу з відходів тварин // Магістерська дисертація. Київ. 2018. С. 30.
6. Nayyat U., Khan M. U., Sultan M. A Review on Dry Anaerobic Digestion: Existing Technologies, Performance Factors, Challenges and Recommendations // Methane. 2024. Vol. 4, No. 1.
7. Safarin S., Unnthorsson R. A review of biomass gasification modeling // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2019. Vol. 110.
8. Pheakdey D. V. Landfill biogas recovery and its contribution to greenhouse gas mitigation // Energies. 2023. Vol. 16. No. 12.
9. Biogas Handbook. Energypedia. 2023. [Електронний ресурс] – Режим доступу: https://energypedia.info/wiki/Biogas_Handbook?utm

3.11 ЕКОЛОГІЧНІ НАПРЯМИ ФОРМУВАННЯ ГІДРОФОБНОСТІ ШКІР

Крупа Р. А.¹, Горбачук О. О.², Охмат О. А.¹

¹Київський національний університет технологій та дизайну

²Державний торговельно-економічний університет, м. Київ
oxmat.oo@knuutd.edu.ua

Робота присвячена обґрунтуванню напрямів гідрофобізації шкір із екологічним спрямуванням. Проаналізовано відомі способи забезпечення різних рівнів гідрофобності натуральних шкір під час рідинного оздоблення та покривного фарбування. Окреслено види хімічних матеріалів та технологічних обробок, які мають екологічне спрямування та здатні формувати водостійкість структури та поверхні натуральних шкір.

Ключові слова: натуральна шкіра, гідрофобні властивості, екологічно спрямовані матеріали, способи гідрофобізації

Формування гідрофобних властивостей натуральних шкір досягається обмеженою кількістю технологічних рішень, які не завжди враховують екологічний аспект [1]. Встановлено [1-3], що для досягнення гідрофобності найбільш доцільно використовувати хромований напівфабрикат. Він має знижені показники набухання, підвищену термічну стійкість та зменшену гігроскопічність, що вигідно вирізняє його на фоні напівфабрикату рослинного дублення з характерною підвищеною гідрофільністю. Крім того, кількість екологічно безпечних хімічних матеріалів, здатних надавати гідрофобність натуральним шкірам, є обмеженою. Наразі відомі способи застосування матеріалів на основі природних жирів і їх модифікованих форм, синтетичних жирувальних агентів (восків або парафінів), синтетичних жирних кислот, силосанів, фтормістких сполук, а також синтетичних полімерних матеріалів тощо [4, 7-9, 10, 11-18]. Разом із тим відсутні чіткі рекомендації щодо досягнення конкретного рівня гідрофобності чи створення повністю водонепроникного ефекту, що має важливе значення для виробництва захисного, робочого або військового взуття. У зв'язку з цим виникає потреба в комплексному аналізі інноваційних підходів до виробництва натуральних шкір із гідрофобними властивостями, що робить це завдання надзвичайно актуальним.

Розглянуті дослідження щодо формування гідрофобних властивостей натуральних шкір із урахуванням впливу різних хімічних матеріалів та сучасних технологічних рішень інноваційного характеру.

Традиційні методи створення гідрофобності натуральних шкір передбачають використання жирувальних матеріалів (натуральних, модифікованих або синтетичних) для змащування поверхні структурних елементів дерми, що дозволяє створити жирову плівку на волокнах або фібрилах. Ця плівка блокує проникнення до гідрофільних центрів

колагену, дозволяючи воді проходити лише через пори та капіляри, але не через поперечний переріз волокон або фібрил. Однак такі технології мають обмежене застосування на даний час, оскільки вони не забезпечують рівномірного розподілу жирувальних матеріалів по структурних елементах, закривають міжструктурний простір дерми, збільшують вагу шкіри та значно погіршують її гігієнічні властивості.

Подальше вдосконалення традиційних підходів до формування гідрофобності шкір включає використання синтетичних жирувальних матеріалів, таких як парафіни або воски, у поєднанні з солями металів (наприклад, хрому, алюмінію, цирконію). Механізм дії яких базується на утворенні гідрофобних миль на поверхні структурних елементів дерми [4, 10].

Різноманітні підходи до покращення гідрофобізації натуральних шкір включають використання четвертинних амонієвих сполук, модифікованих або емульгованих форм синтетичних жирних кислот, композицій з хромовими сполуками та синтетичними жирними кислотами, похідних меламіну і етиленсечовини із синтетичними жирними кислотами, кремнійорганічних речовин, фторованих вуглеводневих сполук тощо [4, 10-12]. Практикується також обробка натуральних шкір за допомогою синтетичних полімерів на основі фторкремнієвих і фторкарбонієвих сполук, кополімерів ефіру малеїнової кислоти та α -оксипропілдіметилсилоксану (у співвідношенні 2:1), акрилової кислоти та 1-октадекану [4, 10, 13], а також полімерних систем на основі полівінілетинілдігідроксихлорсилану [4, 10, 16].

Дослідження підтверджують, що одним із перспективних напрямків у підвищенні гідрофобності шкір є спільне використання сполук силанового, карбонільного, карбоксильного та гідроксильного типів [4, 10, 17]. Зокрема, високий рівень гідрофобізації досягається завдяки застосуванню у післядубильних процесах матеріалів на основі фторсиланів та фторсилоксанів [4, 10, 18]. Це сприяє утворенню на поверхні дермальних структурних елементів захисної бар'єрної плівки, що значно покращує їхні водовідштовхувальні властивості.

Інноваційні екологічно спрямовані підходи до створення гідрофобних натуральних шкір здебільшого спрямовані на вдосконалення технологій використання синтетичних полімерних матеріалів у поєднанні з різноманітними природними модифікаторами. Дослідження демонструють, що підвищення стійкості натуральної шкіри до впливу вологи можливе завдяки процесу гідрофобізації шкіряного напівфабрикату за допомогою композиції, що включає алкенмалеїновий полімер, олеїнову кислоту та риб'ячий жир [4, 10, 19]. Завершальним етапом є закріплення інгредієнтів цієї композиції алюмокалієвим галуном. Взаємодія компонентів композиції з колагеновими волокнами сприяє утворенню міцних водостійких зв'язків. Гідрофобний ефект досягається шляхом блокування гідрофільних ділянок колагену дерми, що забезпечує зростання гідрофобності та підвищує рухливість елементів фібрилярної структури

дерми [4, 10, 19]. Зазначена технологія дозволяє отримати натуральну шкіру з водостійкими та водонепроникними властивостями.

Іншим перспективним напрямком є розробка [20] амфіфільних співполімерів із різними гідрофобними структурами бічних ланцюгів шляхом радикальної сополімеризації акрилової кислоти з гідрофобними акрилатними мономерами. Ці співполімери були використані для обробки хромового напівфабрикату, демонструючи ефективність завдяки своїй гідрофобній структурі бічних ланцюгів, зокрема лінійних. Порівняно з розгалуженими структурами, кополімери з лінійними гідрофобними ланцюгами демонструють значно кращі властивості. Якщо довжина бічного ланцюга перевищує C16, досягається максимальний рівень водонепроникності, зберігаючи при цьому м'якість і механічну міцність шкіряного матеріалу. Встановлено, що волокна у шкірі завдяки такій обробці рівномірно розділені і оточені лінійними гідрофобними ланцюгами [20]. Це сприяє зниженню гідрофільності колагенових волокон, підвищує їхню інертність до впливу води та забезпечує формування водостійких і водонепроникних властивостей шкір, без порушення їхньої гігієнічності.

Сучасні інновації у сфері жирування та гідрофобізації шкіряного напівфабрикату включають використання твердого емульгатора, створеного на основі екологічно-безпечної дисперсії монтморилоніту, модифікованої алюмінієвими сполуками та олеїною кислотою [21]. Ця технологія ґрунтується на використанні гідрофобної наноконпозиції для виробництва верхніх шарів взуттєвої шкіри, що дозволяє знизити вартість виготовлення гідрофобних матеріалів та розширити базу сировини для створення емульгаторів. Отримана шкіра демонструє високу стійкість до впливу вологи як у статичних, так і в динамічних умовах [22], а також характеризується відмінними водовідштовхувальними властивостями.

Доведено ефективність використання комплексного підходу для підвищення рівня водонепроникності шкіри. Він передбачає почергову обробку синтетичними жирувальними матеріалами під час стадії жирування, а також синтетичними полімерними матеріалами на етапі гідрофобізації. Для підсилення цього ефекту рекомендовано наносити захисне гідрофобне покриття без використання фторвмісних полімерів [8].

Однією з неординарних інновацій в області гідрофобізації натуральної шкіри є метод, що включає попередню дегідратацію колагенової структури з її подальшою супергідрофобною модифікацією. Перевага цієї технології полягає в можливості застосування її для напівфабрикату, отриманого за альдегідного або рослинного дублення. Задля досліджень були використані колагенові волокна як модель шкіри, щоб виключити проникнення гідрофобного матеріалу в її структуру. Попередню дегідратацію забезпечено завдяки застосуванню етанолу, який видаляє воду з колагену та формує окремі ієрархічні структури. Подальша супергідрофобна модифікація суттєво підвищує здатність волокон до диспергування і стабільності, що, своєю чергою, захищає пористу і розгалужену структуру дерми від проникнення води. Встановлено, що

після проведення цього процесу на поверхні структурних елементів дерми формується водовідштовхувальний шар. При цьому капілярно-пориста структура дерми зберігає високий рівень дисперсності.

Технології створення гідрофобних властивостей натуральних шкір отримують значний розвиток у рамках процесів покривного оздоблення. Ці технології спрямовані на забезпечення водовідштовхувальних характеристик матеріалів, але їх поєднання з методами гідрофобізації за допомогою синтетичних полімерів дозволяє досягти не лише водостійкості, а й водонепроникності натуральних шкір.

Одним із перспективних підходів є використання силіконових або фторполімерних матеріалів у комбінації з металізацією, що дозволяє формувати лицьову поверхню шкіри, здатну ефективно відштовхувати воду та бруд [23-25]. Реалізація цього методу базується на дотриманні двох фундаментальних принципів: зменшення величини вільної поверхневої енергії матеріалів та модифікації їхньої морфологічної структури. Суть механізму полягає в тому, що висока шорсткість поверхні сприяє утворенню шару повітря під краплиною води [26], який виконує бар'єрну функцію, сприяючи скочуванню води з поверхні.

Ефективність такого підходу наочно ілюструється на прикладі полідиметилсилоксану, застосування якого забезпечує створення поверхні з виключно високими гідрофобними властивостями, що повністю виключають поглинання води.

Останні інновації включають використання неорганічних наночастинок та сучасних полімерних матеріалів [27-28]. Для досягнення водовідштовхувальних властивостей шкіри ефективним є застосування фторполімерних покриттів, які формують на її поверхні мікро- та наноструктури. Ці структури утримують повітря та запобігають контакту рідини з поверхнею матеріалу. Розробка нових фторполімерів із покращеними характеристиками відкриває ширші перспективи для їх використання у різних галузях [29].

Окрім цього, введення гідрофобного покриття на етапі обробки шкіри показало підвищення стійкості кольору до впливу води. Цей ефект досягається завдяки зменшенню адгезії води до поверхні матеріалу, що уповільнює проникнення рідини вглиб і взаємодію з барвником. У результаті значно зростає стійкість кольору до впливу вологого стирання [30]. Такі покриття також сприяють збільшенню зносостійкості, а також повітро- та паропроникності, але водночас негативно впливають на оптичні властивості шкіри [31].

Для створення покриттів при оздобленні гідрофобних шкір ефективно застосовують золь-гелеві склади, які завдяки своїй особливій структурі та невеликій товщині залишаються прозорими й стійкими. У процесі вдосконалення таких покриттів значна увага приділяється їх антиабразивним, водо- та масловідштовхувальним властивостям [32], а також здатності захищати від ультрафіолетового випромінювання [33].

Найчастіше використовуються золь-гелеві покриття на основі оксиду кремнію, як і оксиди алюмінію, цирконію, титану та цинку [34].

Ще одним методом для досягнення гідрофобності шкіри є плазмова полімеризація. Ця технологія передбачає зміну поверхневих характеристик матеріалу шляхом нанесення тонкого полімерного шару. Завдяки цьому досягається підвищена гідрофобність поверхонь шкіри [35]. Процес включає випаровування мономерів, які потім вводяться в реактор для проведення полімеризації плазмою. Подальше осідання полімерів на поверхню забезпечує необхідний ефект [36]. Ця методика екологічно безпечна, а також характеризується високою ефективністю.

Аналіз підтверджує значний потенціал інноваційних екологічно-спрямованих матеріалів і сучасних технологічних методів у процесі досягнення гідрофобних властивостей для натуральної шкіри різного типу. Оптимальний вибір матеріалів та технологій гідрофобізації варто здійснювати залежно від запланованого рівня захисту й конкретного призначення шкіри, наприклад, для виготовлення захисного, робочого чи військового взуття.

Висновки. В статті визначено, що процеси жирування-гідрофобізації та гідрофобізації забезпечують шкірі гідрофобних властивостей та впливають на її гігієнічність, еластичність та зносостійкість. Встановлено, що сучасні гідрофобізуючі матеріали на основі синтетичних жирувальних та синтетичних полімерних сполук, в тому числі їх модифіковані форми, здатні забезпечувати виробництво шкір з урахуванням різного рівня гідрофобності відповідно призначення кінцевого виробу та необхідних функціональних характеристик. Доведено, що комбінований підхід до обробки шкіри та поєднання різноманітних методів гідрофобізації та нанесення захисного полімерного покриття забезпечує набуття максимальних гідрофобних властивостей. Однак, існуючі технології мають певні обмеження, що пов'язано з використанням екологічно небезпечних хімічних речовин, значних витрат сировини та впливом на довкілля.

Інноваційними напрямками в гідрофобізації шкір є технічні обробки, які істотно оптимізують виробництво, мають знижену матеріаломісткість, характеризуються більшою екологічністю. В результаті додаткових технологічних обробок натуральна шкіра може набувати високого рівня гідрофобності. Це зумовлює перспективність їх використання для виробництва тактичного взуття для військових.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Горбачук О., Мокроусова О., Скиба М. Інноваційні підходи до формування гідрофобних властивостей натуральних шкір. *Вісник ХНУ. Технічні науки*. 2024. Том 354. № 6 (2). С.196-206.
2. Reich G., Taeger T. From collagen to leather – the theoretical background. BASF Service center, 2007. 337 p.
3. He X., Wang Y. N., Zhou J., Wang H., Ding W. Suitability of Pore Measurement Methods for Characterizing the Hierarchical Pore Structure of Leather. *JALCA*, 2019. Vol. 114, P. 41-47.

4. Данилкович А. Г., Романюк О. О. Формування шкіряних і хутрових матеріалів спеціального призначення : монографія / за редакцією А. Г. Данилковича. Рига, Латвія : Baltija Publishing, 2021. 198 с.
5. EN ISO 5403-1:2011, IULTCS/IUP 10-1:2011. Leather – Determination of water resistance of flexible leather - Part 1: Repeated linear compression (penetrometer). Data aktualizatsii: 01.01.2011.
6. ASTM D 2099-00. Standard Test Method for Dynamic Water Resistance of Shoe Upper Leather by the Maeser Water Penetration Tester. Data aktualizatsii: 01.01.2023.
7. Waterproof leather making. Checklist. Smit and Zoon. 2021. URL: <https://www.smitzoon.com/en/waterproof-leather/>
8. Manufacturing water resistant leather. Water resistant products. Booklet. Smit and Zoon. 2021. URL: <https://www.smitzoon.com/en/waterproof-leather/>
9. Martin Heise. Waterproof leather making process. Guidelines. Smit and Zoon. 2021. URL: <https://www.smitzoon.com/en/waterproof-leather/>
10. Данилкович А.Г., Ліщук В.І., Формування гідрофобізованих шкіряних і хутрових матеріалів. *Наукові праці НУХТ*, 2020. Том 26, № 5. С. 32-40.
11. Мокроусова О. Р., Качан Р. В., Козарь О. П. Сучасні аспекти післядубильних процесів виробництва шкіри. *Технології та дизайн*, 2013. № 4 (9). С. 1–12.
12. Лисенко Н. В. Товарознавча оцінка шкір із гідрофобною обробкою для взуття спеціального призначення : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : 05.18.08. Львів, 2015. 57 с.
13. Ramon P., Agustín M., Factors influencing the waterproofing behavior of retanning-fatliquoring polymers. Part I. *JALCA*, 2004. Vol. 99, P. 409-415.
14. Danish P., Kneip M.; Modern hydrophobic systems: new water repellents and retannages for shoe uppers. *JALCA*, 1996. Vol. 91, P. 120-125.
15. Hodder J. J. Waterproof leather technologies and processes. *JALCA*, 1995. Vol. 90, P. 82-87.
16. Bertaux E., Le Marec E., Crespy D., Rossi, R., Hegemann, D.; Effects of siloxane plasma coating on the frictional properties of polyester and polyamide fabrics. *Surf. Coat. Technol*, 2009. Vol. 204, P. 165-171.
17. Privett B. J., Youn J., Hong S.A.; Antibacterial fluorinated silica colloid superhydrophobic surfaces. *Langmuir*, 2011. Vol. 27, P. 9597-9601.
18. Kleban M., Markgraf K., Reiners J. Waterproofing of leather-state of the art and new concepts. *JALCA*, 2002. Vol. 97, P. 487-495.
19. Данилкович А. Г. винахідник. Спосіб гідрофобізації-жирування еластичних шкір. Український патент, по 134919, 2018.
20. Jinxia D., Cai H., Biyu P. Influence of Hydrophobic Side Chain Structure on the Performance of Amphiphilic Acrylate Copolymers in Leather-making. *JSLTC*, 2016. Vol.100. № 2. P. 67-72.
21. Мокроусова О.Р., Данилкович А.Г., Олійник М.М. Спосіб жирування гідрофобізації шкіряного напівфабрикату. Український патент, по u200800949, 2008.
22. L. de, A. Lorenzi, F. Tassi, L. Draghi. Organic-inorganic Hybrid Coatings via Sol-gel Route for Leather Finishing. *J. Amer. Leather Chem. Ass.* 2019. Vol.114. № 8. P. 293-299.
23. He X., Huang Y., Xiao H., Xu X., Wang Y., Huang X., Shi B.; Tanning Agent Free Leather Making Enabled by the Dispersity of Collagen Fibers Combined with Superhydrophobic Coating. *Green Chem*, 2021, Vol. 23. P. 3581–3587.
24. Silvestre C. R., Blasco M. P. C., López S. R., Aguilar H. P., Limiñana M. Á. P., Gil E. B., Calpena E. O., Ais F. A. Hydrophobic Leather Coating for Footwear Applications by a Low-Pressure Plasma Polymerisation Process. *Polymers*, 2021. Vol. 13, P. 3549.

25. Ramesh R. R., Jonnalagadda R. R. Fabrication of Zirconium Based Coordination Polymers for Fluorine/Silane Free Superhydrophobic Coatings. *Chemical Engineering Journal*, 2022. P. 1431-1462.
26. Barthlott W., Neinhuis C. Purity of the Sacred Lotus, or Escape from Contamination in Biological Surfaces. *Planta*. 1997, Vol. 202, P. 1–8.
27. Kopp V. V., Agustini C. B., Gutterres M., Santos J. H. Z. Nanomaterials to Help Eco-Friendly Leather Processing. *Environ Sci Pollut Res*, 2021. Vol. 28, P.55905–55914.
28. Wang X., Wang W., Liu X., Wang Y. Amphoteric Functional Polymers for Leather Wet Finishing Auxiliaries: A Review. *Polymers for Advanced Technologies*. 2021, Vol. 32. P. 1951–1964.
29. Hayakawa Y., Terasawa N., Hayashi E., Abe T. Synthesis of Novel Polymethacrylates Bearing Cyclic Perfluoroalkyl Groups. *Polymer*, 1998. Vol. 39. P.4151–4154.
30. Wang Z., Sun Z., Chen X., Zou W., Jiang X., Sun D., Yu M. Color Fastness Enhancement of Dyed Wood by Si-Sol@PDMS Based Superhydrophobic Coating. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2022. 651:129701.
31. Ramesh R. R., Arathanaikotti D., Javid, M. A., Vijayarangan K., Rathinam A. Studies on the Fabrication of Hydrophobic Coating Incorporating Bentonite Clay and its Effect on the Physical Properties of the Finished Leather. *J. Amer. Leather Chem. Ass.* 2023. Vol.118. № 2. P. 67-74.
32. De Ferri L., Lorenzi A., Carcano E., Draghi L. Silk fabrics modification by sol–gel method. *Text. Res. J.*, 2017. Vol. 88. P. 99 –107.
33. Cui H., Zayat M., Parejo P. G., Levy D. Highly Efficient Inorganic Transparent UV-Protective Thin-Film Coating by Low Temperature Sol-Gel Procedure for Application on Heat-Sensitive Substrates. *Adv. Mater.*, 2008. Vol. 20, P. 65–68.
34. Brinker C.J., Sherrer G.W. Sol–gel science: The physics and chemistry of sol–gel processing. *Academic Press*, 1990. 462 p.
35. Kim S. H., Kim J. H., Kang B. K., Uhm H. S. Superhydrophobic CF_x Coating via In-Line Atmospheric RF Plasma of He–CF₄–H₂. *Langmuir*, 2005. Vol. 21, № 26, P. 12213–12217.
36. Cech V., Xu, L. H., Vanek J., Drzal L. T. Deposition of Single Plasma-Polymerized Vinyltriethoxysilane Films and their Layered Structure. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2006. Vol. 45, P. 8440-8444.

3.12 РОЛЬ ЕКОЛОГІЧНО-ОРІЄНТОВАНИХ ШКІР У ФОРМУВАННІ СПОЖИВНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ВЗУТТЯ

Туркот К. В., Мокроусова О. Р.

Державний торговельно-економічний університет
o.mokrousova@knutd.edu.ua

Робота присвячена визначенню ролі розробки та впровадження виробництва екологічно-спрямованих натуральних шкір для прогнозування та забезпечення споживних властивостей взуття. Проаналізовано основні споживчі переваги щодо екологічної продукції та вибору взуття із натуральної шкіри. Визначено роль різних етапів життєвого циклу формування екологічності натуральних шкір. Сформовано інноваційні напрями застосування біополімерних матеріалів на основі білоквмісних речовин, отриманих з відходів шкіряного виробництва. Спрогнозовано практичну цінність запропонованих напрямів у забезпеченні споживних властивосте натуральних шкір та взуття.

Ключові слова: натуральна шкіра, споживчі властивості, взуття, біополімерні сполуки, життєвий цикл продукції

Використання взуття сьогодні обумовлено утилітарними та естетичними потребами споживачів. Взуття захищає стопу людини від зовнішніх впливів природного походження (опади, температуру, пил, бруд тощо) чи механічного, забезпечує комфорт у повсякденному житті та безпеку під час виконання трудової діяльності [1]. Призначення взуття обумовлює цілеспрямований підбір взуттєвих матеріалів для його виготовлення, сучасний асортимент яких характеризується стрімким розвитком завдяки впровадженню інноваційних технологій виробництва шкіряних, гумових, текстильних та полімерних матеріалів тощо [2, 3, 4]. Враховуючи здатність багатьох видів взуттєвих матеріалів забезпечувати захист стопи людини під час експлуатації взуття, а саме, зменшувати вплив механічних пошкоджень, нівелювати фактор погодних умов, полегшувати рухи під час фізичної діяльності та інше, все ж таки створення фізіологічно та гігієнічно необхідного «мікроклімату» всередині взуття здатні забезпечувати, в основному, натуральні шкіри. Це визначено унікальною ієрархічною структурою натуральних шкір, хімічним складом та системою специфічних фізико-механічних та фізико-хімічних властивостей. Наявність високорозвиненої капілярно-пористої колагенової структури дерми, як основи натуральних шкір, пояснює можливість цілеспрямованого формування необхідних гігієнічних, деформаційних, міцностних та інших характеристик [5].

Особливість сучасного виробництва шкіри є використання сировини тваринного походження, багатостадійність технологічного процесу, застосування широкого спектру хімічних матеріалів, високі витрати води

та енергії, значні обсяги стічних вод тощо. При обробці однієї тони шкіряної сировини утворюється в середньому тільки 200 кг готової шкіри, але також 200 кг дублених відходів, до 400 кг недублених відходів і 40 м³ стічних вод [6]. Тому питання виробництва натуральних шкір пов'язують із суттєвими екологічними аспектами та пролобійованими біоетичними питаннями, що негативно впливає на позиціонування виробів із натуральної шкіри на товарному ринку. При цьому факт високих гігієнічних та функціональних властивостей натуральних шкір, що є суттєвою відмінною перевагою від інших взуттєвих матеріалів, втрачає важливість перед споживачем на ринку взуття.

Вимоги споживача під час вибору взуття окреслені широким переліком, який ґрунтується на зручності та комфортності моделей, якості взуттєвих матеріалів, надійності та довговічності, відповідності тенденціям моди, вартістю тощо. При цьому вибір сучасного споживача характеризується активно прогресуючою позицією щодо питань екології довкілля та людини.

Обізнаність споживача стосовно екологічності товарів та матеріалів для їх виготовлення, безпечних методів виробництва, впровадження біоетичних норм раціонального використання природної сировини та принципів безвідходності технологічного процесу, застосування екологічно-безпечних та поновлених ресурсів з відходів виробництва та багато іншого відіграє багатогранну роль у впливі на споживчу поведінку при виборі та купівлі, в тому числі, взуття з натуральних шкір.

Більшість споживачів відносяться до категорії «поміrkованих» (65 %), які свій купівельний вибір роблять на раціональному підході, і чим більше «позитивної» інформації буде мати споживач про товар, тим більш зваженим буде його вибір та готовність придбати цей товар.

Свідомий вибір споживача щодо екологічної продукції залежить від доступних знань про безпечність виробництва, матеріалів або вже готового товару, що нап'язу пов'язано зі стадіями життєвого циклу товару [7, 8].

Кожна стадія життєвого циклу будь-якого товару у відповідній мірі впливає на навколишнє середовище та відображається на етапах: *виробництво, експлуатація (споживання) або утилізація товару*, чим обумовлює екологічний аспект, як елемент взаємодії довкілля і самої продукції в рамках різних етапів підприємницької та торговельної діяльності.

На етапі життєвого циклу «*Виробництво*» під час отримання натуральних шкір для взуття можна досягнути підвищення рівня екологічності шляхом: раціонального використання природних ресурсів; застосування екологічно-безпечних матеріалів або виключення з технологічного процесу небезпечних хімічних матеріалів і речовин; впровадження ресурсозбережних, екологічно-орієнтованих, безвідходних, енергоощадних або інших видів технологій; повторного використання відходів біогенного походження або побічних продуктів виробництва, застосування енергоефективного та високо продуктивного обладнання тощо.

Етап «*Експлуатації або споживання*» визначається властивостями

шкіряних матеріалів, з яких виготовлене взуття. В зв'язку з цим взуттєві шкіряні матеріали повинні бути за хімічними та фізико-механічними властивостями безпечними для здоров'я людини і не створювати небезпеку функціонуванню організму фізичних навантаженнях або в широкому температурному інтервалі.

Підвищення рівня екологічності шкіряних матеріалів на етапі «Утилізація» може бути досягнуто шляхом прискорення періоду розкладання в природному середовищі через зменшення в складі натуральних шкір небезпечних матеріалів, підвищенні вмісту природних, екологічно-орієнтованих, біорозкладних речовин тощо [9-11].

Останні тенденції розвитку технологій виробництва натуральних шкір пов'язані з інтеграцією в технологічний процес екологічно-безпечних матеріалів, повного чи часткового виключення шкідливих матеріалів, впровадження принципів повторного використання стічних вод тощо. Наразі, відомо способи використання різнофункціональних матеріалів на основі модифікованого монтморилоніту для дублення, наповнювання та оздоблення натуральних шкір, що вже забезпечило зменшення кількості використання шкідливих матеріалів у виробництві, збільшення виходу готових шкір з одиниці маси сировини, підвищення якості та безпечності натуральних шкір тощо. Запроваджені дії дозволили підвищити рівень екологічності натуральних шкір з категорії «Екологічно-прийнятні товари» – товари, що вносять екодеструктивні зміни у межах асиміляційних можливостей довкілля, які є економічно ефективними і екологічно безпечними при їх виробництві, споживанні та утилізації, до категорії «Екологічно-нейтральні товари» – товари, виробництво та споживання яких не руйнує довкілля. Однак, досягнення найвищого рівня екологічності натуральних шкір відповідно категорії «Екологічно-спрямовані товари», як товари, виробництво та споживання яких вносить позитивні зміни в довкілля або дозволяє уникнути порушень складових біосфери, може бути пов'язано із реалізацією декількох напрямів, а саме: використання екологічно-безпечних матеріалів у виробництві шкіри та матеріалів на основі переробки відходів. Це дозволить інтегрувати у виробництво принцип «відходи шкіри – в шкіру», що, загалом, зменшить також кількість відходів в ланцюжку «шкіряна сировина – шкіра – взуття з натуральної шкіри», відсотковий вміст яких на даний момент окреслюється цифрою – 40 % колагенвмісної сировини.

Отже, цілеспрямоване формування споживних властивостей натуральних шкір найвищого рівня екологічності шляхом використання нових екологічних матеріалів, отриманих із недублених відходів в технологічному процесі виробництва шкіри, відіграє вирішальну роль у забезпеченні високого рівня споживчої зацікавленості при виборі взуття.

Інноваційним напрямом формування екологічності шкір є використання в післядубильних процесах біополімерних матеріалів на основі білоквмісних речовин, отриманих з міздри, голинної обрізі та голинного спілку, як відходів підготовчих процесів виробництва шкіри.

Біополімерні матеріали отримують шляхом постадійного кислотного екстрагування колагену – основного білка шкіри тварин, з зазначених недублених відходів. Застосування біополімерних матеріалів спільно з модифікованими дисперсіями монтморилоніту під час наповнювання-додублювання шкіряного напівфабрикату може частково або повністю замінити використання акрилових наповнювачів та синтанів в післядубильних процесах, зменшити витрати синтетичних барвників, підвищити ефективність хімічного зв'язування функціональних груп колагену з активними групами рослинних дубителів, підвищити глибину та насиченість фарбування, забезпечити рівень формування об'ємної структури дерми, збільшити вихід шкір за площею та підвищити їх якість й безпечність. Зазначені напрями підвищення рівня екологічності натуральних шкір можуть бути підґрунтям для удосконалення системи споживних властивостей натуральних шкір та сприятимуть формуванню стратегії впливу на споживчу поведінку під час вибору взуття із натуральних шкір.

Практична значимість зазначених інновацій може сприяти розширенню асортименту матеріалів для виробництва шкір; формуванню практичних рішень застосуванню біополімерних матеріалів на основі недублених відходів шкіряного виробництва; отриманню натуральних шкір для верху взуття із застосуванням біополімерних та високодисперсних матеріалів; впровадженню параметрів отримання натуральних шкір на основі біополімерних та високодисперсних матеріалів; розробці стратегії впливу на споживчу поведінку під час вибору взуття із натуральних шкір.

Висновки. Визначено роль розробки та впровадження виробництва екологічно-спрямованих натуральних шкір для прогнозування та забезпечення споживних властивостей взуття. За результатами аналізу основних споживчих переваг щодо екологічної продукції та вибору взуття із натуральної шкіри визначено роль різних етапів життєвого циклу у формуванні екологічності натуральних шкір. Сформовані інноваційні напрями застосування біополімерних матеріалів на основі білоквмісних речовин, отриманих з відходів шкіряного виробництва, дозволили спрогнозувати практичну цінність напрямів у забезпеченні споживних властивосте натуральних шкір та взуття.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Стецик Ю. М., Мартосенко М. Г., Попович Н. І. Управління якістю взуття виготовленого з врахуванням вимог сталого розвитку. *Цифрова економіка та економічна безпека*. 2025. Вип. 3 (18). С. 178-182.
2. Бойко Г.А., Тіхосова Г.А., Капітонов А.В. Товарознавча оцінка якості взуття з тканиною верху на основі волокон технічної коноплі. *Товарознавчий вісник*. Луцьк, 2022, № 15/1, С. 166-175.
3. Бойко Г.А. Ринок взуття з конопляного волокна. *Міжнародний науково-практичний журнал «Товари і ринки»*. Київ, 2024. № 3 (51). С. 92-104.

4. Стецик Ю. М. Товарознавчі дослідження натуральної шкіри як складова управління якістю взуттєвими матеріалами. *Економіка та регіон*. 2025: № 1 (96). С.140-147.
5. Maryna Zhaldak, Valentyna Poliuha, Olena Mokrousova, Anna Oleshko, Olena Budiakova, Taras Karavayev. Implementation of the principles of bioeconomy in leather production. *Leather And Footwear Journal*. 2024. Vol. 24. № 4. P. 267-278. <https://doi.org/10.24264/LFJ.24.4.3>
6. Kanagaraj J., Panda Rames C., Kumar Vinodh M. Trends and advancements in sustainable leather processing: Future directions and challenges—A review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2020. 8, 5, <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104379>
7. Мокроусова О.Р., Андреева О.А., Охмат О.А., Ніконова А.В. Інноваційні підходи підвищення екологічності виробництва шкір. *Вісник ХНУ. Технічні науки*. 2018. № 5. С. 221-228.
8. Мокроусова О.Р., Андреева О.А., Гаркавенко С.С., Ніконова А.В., Охмат О.А., Паламар В.А. Оцінювання екологічності натуральних шкір як матеріалів біогенного походження. *Легка промисловість*. 2018. № 3.
9. Olena Mokrousova, Olena Okhmat, Halyna Sakalova, Vitalii Ishchenko, Myroslav Malovanyu. Leather waste to energy: environmental benefits. A review. *Chemistry & Chemical Technology*. 2025, Vol. 19, № 1, P. 131–140. <https://doi.org/10.23939/chcht19.01.131>
10. Мокроусова О. Р., Охмат О. А., Маріін Д. В., А. Кулик А., Сакалова Г. В. Утилізація осадів стічних вод шкіряної промисловості. енергетичні перспективи, *Вісник ВПІ*, Вип. 1, лют. 2025. С. 51–57.
11. Maistrenko L., Iungin O., Pikus P., Pokholenko I., Gorbatiuk O., Moshynets O., Okhmat O., Kolesnyk T., Potters G., Mokrousova O. Collagen obtained from leather production waste provides suitable gels for biomedical applications. *Polymers*. 2022. 14(21). 4749. <https://doi.org/10.3390/polym14214749>

3.13 ЕКОЛОГІЧНІ ПІДХОДИ РІДИННОГО ОЗДОБЛЕННЯ ВОГНЕСТІЙКИХ ШКІР ДЛЯ ВЗУТТЯ

Ліясов І. А.¹, Мокроусова О. Р.^{1,2}

Київський національний університет технологій та дизайну
Державний торговельно-економічний університет
mokrousova.or@knutd.edu.ua

Робота присвячена визначенню чинників формування вогнестійких властивостей натуральних шкір. Встановлено роль гістологічної структури, виду сировини та типу шкіри на рівень займистості в полум'ї та характер поведінки під час горіння. Проаналізовано вплив різних видів матеріалів на рівень вогнестійкості шкір. Визначено інноваційні напрями застосування композитів на основі монтморилоніту для підвищення рівня вогнестійкості шляхом формування ефективного бар'єру на поверхні структурних елементів шкіри.

Ключові слова: *натуральна шкіра, вогнестійкість, термостійкість, монтморилоніт, нанокompозити*

Сучасні технології виробництва шкір для взуття спрямовані, переважно, на досягнення необхідного рівня експлуатаційних властивостей, що забезпечується шляхом застосуванням різнофункціональних матеріалів на різних технологічних етапах. Традиційна багатостадійна та комплексна обробка шкіряних матеріалів обмежує можливість швидкого регулювання технологічним процесом або цілеспрямовану модифікацію структури дерми шкіри для формування певного типу властивостей, наразі, актуальних сьогодні – бактерицидних, теплозахисних, антистатичних, вогнестійких тощо.

Необхідні функціональні властивості шкір для взуття спеціального призначення, в тому числі, для військовослужбовців, пожежників, рятувальників, коригуються у взуттєвому виробництві шляхом формування багатошарових пакетів деталей із текстильних, шкіряних, полімерних матеріалів, штучного або натурального хутра тощо. Саме таким чином забезпечується формування необхідних властивостей готового взуття. Враховуючи підвищені фізичні навантаження людини, довготривале перебування за умов високої вологості та високих/низьких температур під час виконання службових обов'язків, що супроводжуються збільшеним тепло-, паро- та потовиділенням, багатошаровість заготовок деталей ускладнює повітро- і потовідведення, чим знижує гігієнічні, теплозахисні, вогнетривкі властивості взуття, а також негативно впливає на «мікроклімат» у внутрішньому просторі взуття та його комфортність. Слід також враховувати, що в силу певних службових ситуацій, іноді відсутня можливість своєчасного та належного гігієнічного догляду за взуттям в умовах відповідної реальності.

Враховуючи зазначене сьогодні в Україні актуальними є питання розроблення та запровадження принципів цілеспрямованої модифікації структури та властивостей вогнестійких шкір, формування їх якості й безпечності, розширення асортименту різнофункціональних виробів форменного оснащення.

Суттєвим фактором покращення безпеки життєдіяльності людини та її здоров'я при виконанні службових обов'язків є використання вогнестійких шкір для верху взуття, які мають високі екологічні властивості, що, в повній мірі, забезпечується екологічно безпечними технологічними матеріалами.

Продукти термічного розкладання та горіння, що виділяються зі шкіри, можуть містити легкозаймисті та шкідливі органічні речовини, такі як, сполуки, що залишилися після процесів знежирювання, фарбування та інших [1]. В роботах [2] авторами показано вплив окремих процесів обробки шкіри (наприклад, дублення, жирування) та матеріалів для їх виконання, що використовуються як дубильні та жирувальні речовини, додублювальні речовини та ті, що знижують займистість. Відомі дослідження [3-5], які визначають вплив дублення, включаючи застосування різноманітних дубильних речовин (хромового дубителя, танідів, глутарового альдегіду та рослинних дубителів) на займистість та горючість шкіри. Авторами експериментально доведено вплив щільності шкіри на її займистість та горючість. Доведено, що найнижча горючість виявлена у шкірах рослинного дублення з найвищою щільністю. Шкіри хромового дублення та шкіри дублені альдегідами мали нижчі показники вогнестійкості. Також встановлено вплив різних полімерних сполук або плівкоутворювачів (наприклад, на основі поліуретанів, поліакрилатів, нітроцелюлози та протеїнів) на обробку шкіри для забезпечення рівня вогнестійкості. Дослідження показали, що введення пігменту в плівкоутворювальний матеріал збільшує горючість шкіри, але велика кількість фінішного шару забезпечує зниження стійкості до горіння.

Враховуючи горючість шкіри, важливим елементом обробки є процес жирування. Згідно традиційних технологій виготовлення шкір для верху взуття, жирування шкір здійснюють емульсійним способом. Для таких технологій жирувальні матеріали отримують шляхом сульфатування та сульфідної обробки природних жирів. Застосування сульфатування жирів викликає значну займистість шкіри порівняно з сульфідними жирами [6]. Інші дослідження показали що шкіряні матеріали, що містять вогнезахисний реагент, можуть забезпечити значне зниження горючих властивостей шкіри [6-13].

Слід також вказати, що під час термічного розкладання шкіри, органічні сполуки, що виділяються, відносно легко піддаються займанню у полі полум'я або нагрітої поверхні та виділяють токсичні продукти й дим [14, 15]. Враховуючи, що в сучасних технологій дуже часто використовують продукти переробки відходів шкіри, слід враховувати потенційну небезпеку від рівня їх займистості [16-20].

Відомі результати досліджень впливу складу та типу шкіри на швидкість виділення тепла та диму, а також аналіз термостабільності та займистості у полі полум'я. Неналежне зберігання, недбалість протипожежного захисту, або проста необережність може призвести до виникнення пожежі та зміни повітряної атмосфери, як фактор небезпеки навколишнього середовища. Дослідження були проведені на зразках штучних шкір, а також шкір з сировини великої рогатої худоби (ВРХ), овець, кіз, свиней тощо.

Дослідженнями залежності швидкості тепловиділення від часу займання для різних типів шкіри доведено, що при зовнішньому потоці теплового випромінювання, що дорівнює 30 кВт/м^2 , найбільше значення швидкості тепловиділення зафіксовано для лицьових шкір з сировини ВРХ, однак, при тепловому впливі 50 кВт/м^2 , найбільше значення зафіксовано для штучних шкір. Найменше значення коефіцієнта тепловиділення на рівні 30 кВт/м^2 зареєстровано для шкіри з сировини свиней та кіз, а також для шкір кіз для 50 кВт/м^2 термічного впливу. При тепловому впливі 50 кВт/м^2 максимальне значення термостійкості для штучної шкіри було на 45% вище максимального значення термостійкості для свинячої шкіри. Аналіз значення середнього швидкості тепловиділення дозволяє зробити припущення, що при досліджуваних термічних експозиціях найвища середнє значення термостійкості було зафіксовано для штучної шкіри, а найнижче для шкір кіз. Рівень термостійкості для штучної шкіри було на 70–80% нижчим порівняно зі значенням термостійкості для шкір кіз. Встановлено, що штучна шкіра має найкоротший час запалювання та швидко досягає максимального рівня виділення тепла, а найбільша сприйнятливність до займання зафіксована для шкір кіз при 30 кВт/м^2 і для велюру на рівні 50 кВт/м^2 .

Враховуючи кількість максимально виділених оксиду та діоксиду вуглецю з одиниці маси досліджуваних зразків, показано, що найбільші обсяги газу отримано зі шкур свиней при 30 кВт/м^2 тепловиділення, а найменше – для велюру. Для інших видів шкір обсяг виділеного газу знаходиться в майже ідентичних рівнях при певних рівнях тепловиділення. Огляд кількості виділеного оксиду вуглецю при різних значеннях теплової експозиції показує, що, загалом, кількість вивільненого газу більша при нижчому термічному впливі під час досліджень. Штучна шкіра плавиться при високих температурах, на відміну від натуральної шкіри, яка в результаті проведених випробувань, мала тенденцію до усадки та твердіння. Враховуючи максимальне значення інтенсивності виділення, можна припустити, що найбільші обсяги диму отримано на штучній шкірі. Лицьова шкіра із сировини ВРХ та з сировини кіз продемонструвала подібні значення, тоді як найменший рівень виділення диму було отримано для свинячої шкіри.

Аналіз займистості шкіри від помірного полум'я при дослідженні значення температури займання у газовій фазі було виявлено, що з усіх випробуваних типів шкіри штучна шкіра мала найвищий рівень

температури займання (312 °С), потім велюр – з температурою нижче на 11 °С. Найнижча температура займання зафіксована для шкір кіз на рівні 281 °С. Це також підтверджено рівнем найнижчої концентрації продуктів розкладання шкір кіз в результаті горіння при мінімальному рівні займистості. Результати значення температури займання для свинячої шкіри та шкіри відрізнялися на 5 °С, і були в діапазоні 290–295 °С. Термогравіметричний аналіз показав, що на початку термічний розклад для всіх шкір, за винятком штучної шкіри, починався в межах 272–323 °С. Найбільший рівень початку термічного розкладання характерний для штучної шкіри при 323 °С. При цьому встановлено рівень втрати маси на рівні 50 % при температурі 418 °С. За температури 356 °С відбувається початок розкладання свинячої шкіри, що на 62 °С нижче, ніж для штучної шкіри. Різниця температур між іншими видами шкіри становила 23 °С. Найвищий відсоток залишків після термічного розкладання був отриманий для лицьових шкір з сировини ВРХ. Це означає, що даний тип шкіри утворює найменшу кількість газоподібної фази від термічного розкладання.

В цілому, доведено, що найбільше значення швидкості тепловиділення отримано при спалюванні штучних шкір при термічному впливі дорівнює 50 кВт/м². Це свідчить про те, що порівняно з іншими типами шкіри, штучна шкіра виділяє найбільшу кількість тепла в одиницю часу, що чітко впливає на швидкість та інтенсивність пожежі, особливо при термічному впливі, який відбувається безпосередньо перед спалахом під час пожежі. Ці припущення можуть бути підтверджені й на найвищому рівні середньої швидкості тепловиділення, значення швидкості втрати маси та значення максимальної швидкості виділення диму штучних шкір при тепловому випромінюванні 30 і 50 кВт/м² порівняно з іншими шкірами. Найнижчі значення швидкості тепловиділення були зафіксовані під час аналізу зразка свинячої шкіри при тепловій експозиції 30 кВт/м². Це говорить про те, що цей тип шкіри, порівняно з іншими виділяє найменшу кількість тепла за одиницю часу, що обумовлює найменший вплив на займистість. Найбільше значення коефіцієнта димовиділення для штучних шкір свідчить, що при термічному впливі вогню цей тип шкіри має найбільший вплив на зміни забруднення повітря. Максимальна кількість диму і питома емісія оксиду вуглецю і діоксиду вуглецю з окремих видів шкіри залежать від величини термічного впливу (фаза пожежі) і, водночас, вплив на викиди токсичних газів в атмосферу.

Можливою причиною відмінностей в отриманих результатах аналізу шкіри є відсоток певних компонентів та хімічний склад шкіри. Найбільша кількість вуглецю відповідає штучним шкірам через значну кількість полімерних добавок.

Отже, результати проведених випробувань відрізнялися від типів шкіри: тестована штучна шкіра має найбільшу швидкість утворення тепла та диму, найвищу температуру початку термічного розкладання, але при цьому найвищу температуру займання, тому що містить найменшу кількість водню.

Найвища займистість від невеликого полум'я була зафіксована для шкір з кіз, оскільки цей вид шкіри має найнижчу температуру займання, що може означати, що під час термічного розкладання, дані шкіряні вироби з низькими значеннями нижньої межі займистості можуть відносно швидко запалюватись від невеликого полум'я.

Для підвищення екологічності виробництв шкіри для взуття та забезпечення високого рівня вогнестійкості представляє інтерес використання високодисперсних мінеральних глин з основним мінералом – монтморилонітом. У воді під дією натрієвих солей монтморилоніт самодиспергується і утворює стабільні дисперсії з мінімальним розміром часток. Подальша модифікація дисперсій монтморилоніту може забезпечити створення нанокompозитів із прогнозованими властивостями.

Згідно таких напрямів модифікації був створений новий інтумісцентний пожежостійкий (ПС) препарат [21], як проміжна сполука пентаеритриту, оксихлориду фосфору, меламіну та тетрааксігидроксиметилфосфонію хлорид. Зазначений нанокompозит на основі монтморилоніту (ОММТ), модифікований бромідом цетилтриметиламонію (СТАВ) і колагеном [22]. Новий нанокompозит ОММТ був застосований під час дублення шкіри [22]. Використання нанокompозиту забезпечувало ефект обвуглювання, що свідчило про негорючість шкіри та відповідні вогнестійкі властивості. Дослідженнями [23] встановлено рівень горіння шкіри за допомогою термогравіметричного аналізу. Встановлено, що незалежно від матеріалу, заміна N_2 тільки на CO_2 призводить до менших темпів втрати ваги, а зміна реакцій, що відбуваються вище $600^\circ C$, спричиняє гірше вигорання. Отже, технологія із використанням збагаченого киснем спалювання могла б певною мірою полегшити гальмівні ефекти займистості. Авторами доведено, що найбільше значення енергії активації було зафіксовано для моделі атмосфери, яка складається з 80% CO_2 та 20% O_2 , що підтверджено рівнем енергії активації 150,36 кДж/моль. В іншому дослідженні [24] було проведено аналіз впливу розкладання речовин, як похідних меламіну та кремнезему, у процесі додублювання на певні властивості, включаючи горючість. Меламін і діоксид кремнію, як і композит на основі акрилової смоли, були введені в шкіру з ВРХ після процесу хромового дублення. Результати дослідження показали, що зі збільшенням витрат нанокompозиту, втрата маси шкіри зменшилась, що вказує на підвищення термічного опору. Переважний вплив на термостійкість мав меламін.

Також відомо композит на основі водорозчинного поліуретану та органічно-модифікованого монтморилоніту (О-ММТ), як матеріал з перспективним рівнем вогнестійкості в умовах вимушеного полум'я, для, наприклад, зменшення поширення полум'я. Враховано при цьому здатність О-ММТ підвищувати термічну стабільність і механічні властивості водорозчинного поліуретану. Нанокompозити водорозчинного поліуретану/органічно-модифікованого монтморилоніту (ВПУ/О-ММТ) рекомендовано застосовувати як антипірени для обробки шкіри. Для цього

отримано натрій-монтморилоніт (Na-ММТ), модифікований із використанням цетилтриметиламоній броміду (СТАВ) і 3-амінопропілтриетоксисилану (АРТЕS). Наноккомпозити ВПУ/О-ММТ були виготовлені шляхом інтеркаляційної полімеризації *in-situ* і використовується для вогнестійкої шкіряної обробки.

Наноккомпозити були використані для обробки шкір під час покривного оздоблення. Покривні композиції із наноккомпозитом ВПУ/О-ММТ були нанесені на поверхню шкір. Зразки були оброблені наноккомпозитами із вмістом О-ММТ 1-5 % в складі наноккомпозиту.

Вогнестійкість шкір, оброблених наноккомпозитами оцінювали за кисневим індексом (ОІ) випробування та випробування вертикальним полум'ям. Як правило, чим вище значення ОІ, тим кращий вогнезахисний ефект шкіри. Оцінки вогнестійкості шкіри досліджували у вертикальному випробуванні полум'ям за показниками – час після полум'я, час займистості, довжина обвуглювання та втрата ваги шкір. Враховували, що нижчі значення цих параметрів свідчить про кращий вогнезахисний ефект.

Подальше дослідження показало, що вогнезахисні властивості готової шкіри збільшуються зі збільшенням вмісту О-ММТ до 4 мас. %. Подальше збільшення вмісту О-ММТ не має суттєвого впливу на підвищення вогнестійкості готових шкір. Ймовірно, це пов'язано з нерівномірним розподілом відокремлених чарунок О-ММТ в матриці водорозчинного поліуретану. Високий вміст О-ММТ може не утворювати ефективного бар'єрного шару для запобігання полімеру від руйнування. Найбільш домінуючим вогнезахисним механізмом шаруватого силікату є накопичення шарів ММТ на поверхні згоряння конденсованої фази, яка виконує роль бар'єру для доступу O_2 і піролізних газів, таким чином, більш ефективний бар'єрний шар покращує вогнезахисний ефект шкір. Встановлено, що найкращу стійкість до полум'я мають готові шкіри з вмістом 4 мас.% О-ММТ. Отримані шкіри мають високі механічні та вогнестійкі властивості.

Отже, застосування наноккомпозитів на основі монтморилоніту є інноваційним шляхом екологізації шкіряного виробництва та можуть забезпечити хороший вогнестійкий ефект під час проведення процесів рідинного оздоблення.

Висновки. Досліджено напрями формування структури дерми та показано, що процеси додублювання, наповнювання, жирування забезпечують остаточне формування структури шкіри, підвищення фізико-механічних властивостей, формування специфічних функціональних властивостей типу – вогнестійкості, теплозбереження, антистатичності тощо.

Встановлено роль матеріалів та типу шкіри на рівень вогнестійкості. Показано, що високу стійкість до займання та горіння притаманно пухким крупнопористим структурам шкіри. Навпаки, щільна структура упакування колагенових волокон надає максимального рівня вогнестійкості. Такі ефекти можуть бути надані шляхом застосування

рослинних дубителів для додублювання шкір. Також встановлено, що штучні шкіри характеризуються вищою температурою початку горіння, але максимально обвуглюються та створюють високий рівень диму. Найвища займистість від невеликого полум'я зафіксована для шкір з сировини кіз. Отримані шкіри з низькими значеннями нижньої межі займистості можуть відносно швидко запалюватись від невеликого полум'я. Найнижчі значення швидкості тепловиділення зафіксовані для свинячої шкіри, тобто порівняно з іншими видами шкір ці шкіри виділяють найменшу кількість тепла за одиницю часу, що обумовлює найменший вплив на займистість.

На основі монтморилоніту розроблено ряд інтумісцентних нанокompозитів для додублювання та композити на основі водорозчинного поліуретану й модифікованого монтморилоніту для покривного оздоблення. Вогнезахисним механізмом мінералу є накопичення його шарів на поверхні згоряння конденсованої фази, яка виконує роль бар'єру для доступу O_2 і піролізних газів, формуючи ефективний бар'єрний шар для вогнезахисту шкір.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Bacardit, A.; Borràs, M.D.; Soler, J.; Herrero, V.; Jorge, J.; Olle, L.L. Behavior of leather as a protective heat barrier and fire resistant material. *J. Am. Leather Chem. Assoc.* 2010, 105, 51–61.
2. Zhuang, L.H.; Wang, G.W. Discussion on leather flame retarding treatment and techniques. *Leather Sci. Eng.* 2005, 15, 30.
3. Chen, W.; Liu, C.; Gong, Y.; Huang, Z. Influence of tanning on the flammability of leather. *J. Soc. Leather Technol. Chem.* 2007, 91, 159–161.
4. Gong, Y.; Chen, W.; Chen, J.; Gu, H. Influence of finishing on the flammability of leather. *J. Soc. Leather Technol. Chem.* 2007, 91, 208–211.
5. Huang, Z.; Lixin, L.I.; Chen, W.; Gui, H. Influence of fatliquoring on flammability of leather. *J. Soc. Leather Technol. Chem.* 2006, 90, 155–158.
6. Huang, Z.; Li, L.; Wang, Y.; Lin, Y.; Chen, W. Performance of flame retardants on leather. *J. Soc. Leather Technol. Chem.* 2005, 89, 225–231.
7. Zhang, X.; Chen, Y.; Fan, H.; Shi, B. Waterborne polyurethane/O-MMT nanocomposites for flame retardant leather finishing. *J. Soc. Leather Technol. Chem.* 2010, 94, 77–83.
8. Jiang, Y.; Li, J.; Li, B.; Liu, H.; Li, Z.; Li, L. Study on a novel multifunctional nanocomposite as flame retardant of leather. *Polym. Degrad. Stab.* 2015, 115, 110–116.
9. Liutao, Y.; Lixin, L.; Wuyong, C.; Lin, L.; Feng, C. Thermal degradation kinetics and flame retardance of hide treated with montmorillonite-amino resin nano-composite. *J. Soc. Leather Technol. Chem.* 2010, 94, 9–14.
10. Mohamed, O.A.; Abdel-Mohdy, F.A. Preparation of flame-retardant leather pre-treated with pyrovatex CP. *J. Appl. Polym. Sci.* 2006, 99, 2039–2043.
11. Huijiao, L.; Jinwei, Y.; Ling, X.; Minglian, L.; Lixin, L. The synthesis and application of a high performance amino resin nanocomposite as leather flame retardant. *J. Soc. Leather Technol. Chem.* 2012, 9, 5–10.
12. Tang, Y.; Ma, X.; Lai, Z.; Fan, Y. Thermogravimetric analyses of co-combustion of plastic, rubber, leather in N_2/O_2 and CO_2/O_2 atmosphere. *Energy.* 2015, 90, 1066–1074.
13. Wei, Y.; Deng, C.; Zhao, Z.; Wang, Y. A novel organic-inorganic hybrid SiO_2/DPP for the fire retardance of polycarbonate. *Polym. Degrad. Stab.* 2018, 154, 177–185.

14. Alptekin, E.; Canakci, M.; Sanli, H. Evaluation of leather industry wastes as a feedstock for biodiesel production. *Fuel*. 2012, 95, 214–220.
15. Altun, S.; Yas,sar, F. Biodiesel production from leather industry wastes as an alternative feedstock and its use in diesel engines. *Energy Explor. Exploit.* 2013, 31, 759–770.
16. Fela, K.; Wieczorek-Ciurowa, K.; Konopka, M.; Wozny, Z. Present and prospective leather industry waste disposal. *Pol. J. Chem. Technol.* 2011, 13, 53–55.
17. Dixit, S.; Yadav, A.; Dwivedi, P.D.; Das, M. Toxic hazards of leather industry and technologies to combat threat: A review. *J. Clean. Prod.* 2015, 87, 39–49.
18. Aquima, P.; Hansena, E.; Gutterresb, M. Water reuse: An alternative to minimize the environmental impact on the leather industry. *J. Environ. Manag.* 2019, 230, 456–463.
19. Hu, J.; Xiao, Z.; Zhou, R.; Deng, W.; Wang, M.; Ma, S. Ecological utilization leather tannery waste with circular economy model. *J. Clean. Prod.* 2011, 19, 221–228.
20. Gil, R.R.; Girón, R.P.; Lozano, M.S.; Ruiz, B.; Fuente, E. Pyrolysis of biocollagenic wastes of vegetable tanning. Optimization and kinetic study. *J. Anal. Appl. Pyrolysis.* 2012, 98, 129–136.
21. Zhang Xiuli, Chen Yi, Fan Haojun and Shi BI. Waterborne Polyurethane/O-MMT Nanocomposites for Flame Retardant Leather Finishing. *J. Soc. Leather Technol. Chem.* 2012, 94, 77-83.
22. Gilman, J. W., Kashiwagi, T., Lichtenhan, J. D. *J. Soc. Advancement of Material and Process Engineering*, 1997, 33, 40.
- 23 Gorrasi, G., Tortora, M. and Vittoria, V. *J. Polym. Sci., Part B: Polym. Phys.*, 2005, 43, 2454.
24. ASTM D 2863-77. American Society for Testing Materials. ASTM Std 24, 1983.

ЗМІСТ

	Стор.
РОЗДІЛ 2. ПРИКЛАДНА ХІМІЯ	4
2.1 SPECTRAL ANALYSIS OF THE STRUCTURING PROCESS OF EPOXY-OLIGOESTER COMPOSITIONS	5
Chopyk N., Zemke V., Bratyshak M.	
2.2 THE ROLE OF MACHINE LEARNING TECHNOLOGIES IN POLYMER RESEARCH	12
Dmytro Novak	
2.3 THE INFLUENCE OF FOOTWEAR UPPER MATERIALS ON INNER MICROCLIMATE	18
Zbigniew Mikołajczyk, Bogusław Woźniak, Nataliia Popovych	
2.4 THE ECONOMIC ADVANTAGES OF THE CIRCULAR ECONOMY IN THE TANNING INDUSTRY	24
Monika Flisek, Nataliia Popovych, Boguslaw Wozniak	
2.5 УПРАВЛІННЯ АСОРТИМЕНТНОЮ ПОЛІТИКОЮ СИНТЕТИЧНИХ МИЙНИХ ЗАСОБІВ	29
Жалдак М. П., Полюга В. О., Мокроусова О. Р.	
2.6 ЕЛЕКТРООКИСЛЕННЯ КАРБАМІДУ У ПРОЦЕСАХ ВОДНЕВОЇ ЕНЕРГЕТИКИ: ТЕРМОДИНАМІЧНА ОЦІНКА ТА ПРИНЦИПИ ЗЕЛЕНОЇ ХІМІЇ	68
Проценко В. С.	
2.7 ОЦІНЮВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ МОЖЛИВОСТЕЙ ХІМІЧНИХ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ РІДИННОГО ОЗДОБЛЕННЯ ШКІР	83
Заєць А. В., Андреева О. А.	
2.8 ВИКОРИСТАННЯ ВІДПРАЦЬОВАНОГО СОРБЕНТУ ХАРЧОВОГО ВИРОБНИЦТВА ДЛЯ ОЧИЩЕННЯ СТІЧНИХ ВОД	95
Худоярова О. С.	
2.9 ВПЛИВ ПОЛІМЕРНИХ ЗВ'ЯЗУЮЧИХ НА СТАБІЛЬНІСТЬ КОМПОЗИТНИХ АНОДІВ ЛІТІЙ-ІОННИХ АКУМУЛЯТОРІВ	105
Нікулін Д. О., Ляшок М. О., Костенко А. О., Хоменко В. Г.	
2.10 ВЛАСТИВОСТІ ФІТОПЛІВОК ТА ФІТОГІДРОГЕЛІВ НА ОСНОВІ ПВС ТА ПОЛІСАХАРИДІВ	113
Швець В. В., Ляшок І. О., Бутенко О. О., Крюкова О. А., Андрусенко В. В., Лупина Д. О., Корінець В. В.	

2.11	МОРФОЛОГІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ НЕТКАНИХ ВОЛОКНИСТИХ МАТЕРІАЛІВ ОДЕРЖАНИХ МЕТОДОМ ЕЛЕКТРОФОРМУВАННЯ	122
	Сікора А. С., Ляшок І. О., Бутенко О. О., Крюкова О. А., Барков Д. Д., Ковальський В. М.	
2.12	ДОСЛІДЖЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ВИСОКОАДГЕЗИВНИХ КОМПОЗИТІВ	129
	Земке В. М., Чопик Н. В., Братичак М. М.	
2.13	ЄВРОПЕЙСЬКІ ПІДХОДИ ДО ВИКЛАДАННЯ ЗАГАЛЬНОЇ ТА НЕОРГАНІЧНОЇ ХІМІЇ В СТАРШІЙ ШКОЛІ НА ПРИКЛАДІ ІТАЛІЇ	135
	Четвертак Т. Ю., Дюжикова Ю. Ю., Кулик І. О.	
2.14	ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОАКТИВНИХ ПОЛІМЕРНИХ ПЛІВОК	140
	Макеєва І. С., Якубовська К. К.	
2.15	НАЙПЕРСПЕКТИВНІШІ ТЕХНОЛОГІЇ НА ОСНОВІ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ В ХІМІЧНІЙ ПРОМИСЛОВOSTІ	144
	Малишев В. В., Габ А. І.	
2.16	ТЕНДЕНЦІЇ ТА МОЖЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ В ХІМІЧНІЙ ПРОМИСЛОВOSTІ	150
	Малишев В. В., Габ А. І.	
2.17	ХРОМОЩАДНЕ ФОРМУВАННЯ ЕЛАСТИЧНОЇ ШКІРИ	155
	Данилкович А. Г., Охмат О. А.	
2.18	ДОСЛІДЖЕННЯ МІЖМОЛЕКУЛЯРНОЇ ВЗАЄМОДІЇ У ВОДНИХ РОЗЧИНАХ ПОЛІМЕРІВ КОНДУКТОМЕТРИЧНИМ МЕТОДОМ	168
	Гриценко Т. О., Баран Н. М., Собечко І. Б., Дулебова Л.	
	РОЗДІЛ 3. ЕКОЛОГІЯ	177
3.1	TOWARD SUSTAINABLE ECOLOGICAL SYSTEMS: LESSONS FROM CANADA AND UKRAINE	176
	Svitlana Abu Deeb	
3.2	IMPACT OF CLIMATE CHANGES ON THE FUNCTIONING OF AQUATIC ECOSYSTEMS USING THE EXAMPLE OF SMALL RESERVOIRS IN SOUTHERN UKRAINE: A REVIEW	183
	Sofia Melnychenko	
3.3	USE OF COTTON CELLULOSE AS AN ALTERNATIVE	196

RAW MATERIAL IN THE PRODUCTION OF ABSORBENT PAPER GRADES	
Liudmyla Andriievska, Nataliia Marchuk	
3.4 СИСТЕМНИЙ ПІДХІД У ФОРМУВАННІ ЕКОЛОГІЧНОГО ФАКТОРУ ВИКОРИСТАННЯ БАРВНИКІВ В ЛЕГКІЙ ПРОМИСЛОВОСТІ	205
Жалдак М. П., Полюга В. О., Мокроусова О. Р.	
3.5 ЕКОЛОГІЧНІ ПРИНЦИПИ СТАЛОГО РОЗВИТКУ ТУРИЗМУ, ЯК УМОВА РАЦІОНАЛЬНОГО ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ ТА РЕСУРСОЗБЕРЕЖЕННЯ	238
Худавердієва В. А.	
3.6 ВИКОРИСТАННЯ НАСІННЯ АМАРАНТУ AMARANTHUS CRUENTUS L., ВИРОЩЕНОГО В ГРУЗІЇ	275
Кікалішвілі Б. Ю., Кахетелідзе М. Б., Явіч П. А.	
3.7 ОЦІНКА АНТРОПОГЕННОГО ВПЛИВУ БУДІВЕЛЬНИХ РОБІТ НА НАВКОЛИШНЄ СЕРЕДОВИЩЕ	287
Постернак І. М., Постернак О. С.	
3.8 ГАРМОНІЗОВАНЕ УПРАВЛІННЯ ЯКІСТЮ ТА БЕЗПЕЧНІСТЮ ВЗУТТЯ НА РИНКУ УКРАЇНИ	295
Омельченко Н. В., Браїлко А. С.	
3.9 ФОРМУВАННЯ РЕЖИМУ ЗРОШЕННЯ БАГАТОРІЧНИХ ПЛОДОВИХ НАСАДЖЕНЬ В УМОВАХ ЗМІНИ КЛІМАТУ	303
Шемякін М. В., Кисельов Ю. О., Рудий Р. М., Боровик П. М., Удовенко І. О., Прокопенко Н. А.	
3.10 СУЧАСНІ ТЕХНОЛОГІЇ ВИРОБНИЦТВА БІОГАЗУ	309
Фалєєв Ф. Р.	
3.11 ЕКОЛОГІЧНІ НАПРЯМИ ФОРМУВАННЯ ГІДРОФОБНОСТІ ШКІР	314
Крупа Р. А., Горбачук О. О., Охмат О. А.	
3.12 РОЛЬ ЕКОЛОГІЧНО-ОРІЄНТОВАНИХ ШКІР У ФОРМУВАННІ СПОЖИВНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ВЗУТТЯ	321
Туркот К. В., Мокроусова О. Р.	
3.13 ЕКОЛОГІЧНІ ПІДХОДИ РІДИННОГО ОЗДОБЛЕННЯ ВОГНЕСТІЙКИХ ШКІР ДЛЯ ВЗУТТЯ	326
Ліясов І. А., Мокроусова О. Р.	

ПЕРЕЛІК АВТОРІВ

Andriievska Liudmyla	196	Ляшок І. О.	113, 122
Bratychak M.	5	Ляшок М. О.	105
Chopyk N.	5	Малишев В. В.	144, 150
Dmytro Novak	12	Макєєва І. С.	140
Flisek Monika	24	Мокроусова О. Р.	29, 205, 321, 326
Marchuk Nataliia	196	Нікулін Д. О.	105
Mikołajczyk Zbigniew	18	Омельченко Н. В.	295
Popovych Nataliia	18, 24	Охмат О. А.	155, 314
Sofiiia Melnychenko	183	Полюга В. О.	29, 205
Svitlana Abu Deeb	176	Постернак І. М.	287
Woźniak Bogusław	18, 24	Постернак О. С.	287
Zemke V.	5	Прокопенко Н. А.	303
Андрєєва О. А.	83	Проценко В. С.	68
Андрусенко В. В.	113	Рудий Р. М.	303
Баран Н. М.	168	Сікора А. С.	122
Барков Д. Д.	122	Собечко І. Б.	168
Боровик П. М.	303	Туркот К. В.	321
Браїлко А. С.	295	Удовенко І. О.	303
Братичак М. М.	129	Фалєєв Ф. Р.	309
Бутенко О. О.	113, 122	Хоменко В. Г.	105
Габ А. І.	144, 150	Худавердієва В. А.	238
Горбачук О. О.	314	Худоярова О. С.	95
Гриценко Т. О.	168	Четвертак Т. Ю.	135
Данилкович А. Г.	155	Чопик Н. В.	129
Дулебова Л.	168	Швець В. В.	113
Дюжикова Ю. Ю.	135	Шемякін М. В.	303
Жалдак М. П.	29, 205	Явіч П. А.	275
Заєць А. В.	83	Якубовська К. К.	140
Земке В. М.	129		
Кахетелідзе М. Б.	275		
Кисельов Ю. О.	303		
Кікалішвілі Б. Ю.	275		
Ковальський В. М.	122		
Корінець В. В.	113		
Костенко А. О.	105		
Крупа Р. А.	314		
Крюкова О. А.	113, 122		
Кулик І. О.	135		
Ліясов І. А.	326		
Лупина Д. О.	113		

ДЛЯ НОТАТОК

Наукове видання

**ІННОВАЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ ТА ТЕХНОЛОГІЇ:
БІОТЕХНОЛОГІЯ, ПРИКЛАДНА ХІМІЯ,
ЕКОЛОГІЯ**

ТОМ II

Монографія

*За загальною редакцією
д-ра техн. наук, проф. О. Р. Мокроусової,
д-ра техн. наук, проф. В. П. Плаван*

Відповідальний за поліграфічне виконання *Л. Л. Овечкіна*

Підп. до друку 23.12.2025 р. Формат 60x84 1/16.
Ум. друк. арк. 19,75. Облік. вид. арк. 15,47. Наклад 300 пр. Зам. 2305.

Видавець і виготовлювач Київський національний університет технологій та дизайну,
вул. Мала Шияновська 2, м. Київ-11, 01011.

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи до державного реєстру видавців,
виготовників і розповсюджувачів видавничої продукції ДК № 993 від 24.07.2002.