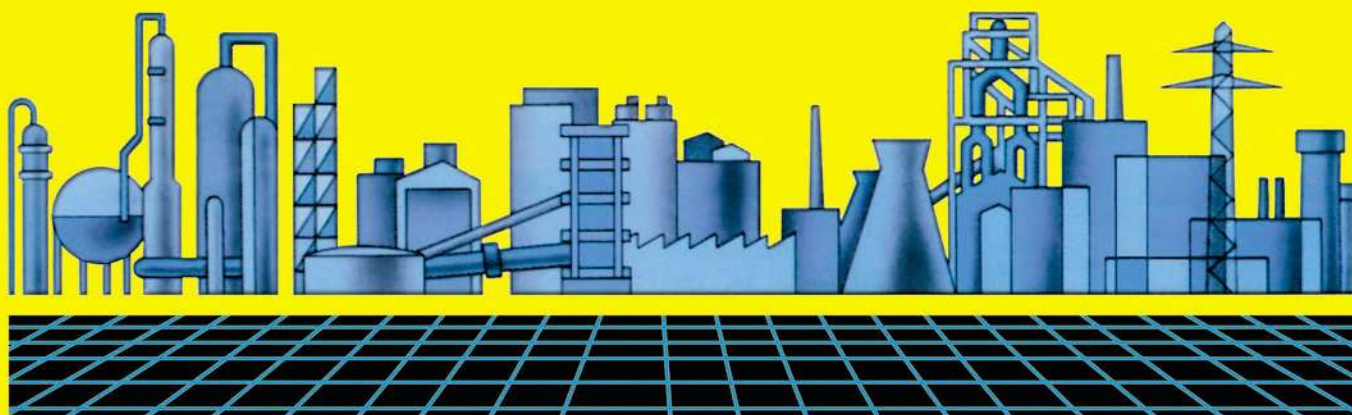


ІТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

ЩОКВАРТАЛЬНИЙ НАУКОВО-ПРАКТИЧНИЙ ЖУРНАЛ



ІТЕ ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

Щоквартальний науково-практичний журнал

2'2026

Видання засновано Харківським державним політехнічним університетом у 1998 році
(від листопада 2000 р. – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»)

Держвидання
Свідчення Міністерства інформації України
КВ № 3427 від 18.08.1998 р.
Свідчення перереєстровано у Міністерстві юстиції України
КВ № 24313-ПР від 06.02.2020 р.
Ідентифікатор медіа R30-02564, згідно з рішенням Національної ради України з питань телебачення і радіомовлення від 11.01.2024 №33

Журнал включений
до переліку наукових фахових видань України
(Наказ Міністерства освіти та науки України №886 від 02.07.2020)
Категорія журналу «Б»

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

Головний редактор
Л. Л. Товажнянський, член-кор. НАН України
Технічний редактор
К. О. Горбунов, канд. техн. наук, доц., зав. каф. ІТПА НТУ "ХПІ"

ЧЛЕНИ РЕДКОЛЕГІЇ:

О. П. Арсеньєва, д-р техн. наук, професор, професор каф. АКІТ ХНУМІ ім. О. М. Бекетова
В. Є. Ведь, д-р техн. наук, професор, професор каф. ІТПА НТУ "ХПІ"
П. О. Некрасов, д-р техн. наук, професор, проф. каф. ТЖПБ НТУ "ХПІ"
П. О. Качанов, д-р техн. наук, професор, зав. каф. АУТС НТУ "ХПІ"
М. П. Кудненко, д-р техн. наук, професор, зав. каф. Теплотехніки та енергоефективних технологій НТУ "ХПІ"
В. В. Стариков, д-р техн. наук, доцент, зав. каф. Технічної кріофізики НТУ "ХПІ"
Г. Л. Хавін, д-р техн. наук, професор, професор НТУ "ХПІ"
А. М. Ганжа, д-р техн. наук, професор, професор каф. ТЕТ НТУ "ХПІ"
О. Б. Аніпко, д-р техн. наук, професор каф. інженерно-авіаційного забезпечення, Харківський національний університет Повітряних сил ім. І. Кожедуба
В. А. Маляренко, д-р техн. наук, професор, професор каф. СЕЕМ ХНУМІ
В. В. Лебедєв, д-р техн. наук, доцент, доцент каф. ТПМ і БАП НТУ "ХПІ"
П. О. Капустенко, канд. техн. наук, професор, акад. Академії будівництва України
Ференс Фридлер, PhD, professor, Pázmány Péter Katolikus egyetem, Budapest, Hungary
Шарифа Рафидан Ван Алви, PhD, professor, Mалайзійський університет технологій
Девид Дж. Куккулька, PhD, professor, Державний університет Нью-Йоркського коледжу у Буффало, США
Євген Кеніг, д-р техн. наук, професор, Падерборнський університет, Німеччина
Мартін Пікон-Нуньєс, PhD, professor, Університет Гуанахуато, Мексика
Петар Варбанов, старший науковий співробітник NETME Center - SPIL, Технологічний університет Брно, Чеська республіка
Майкл Уолмслі, BE, PhD ChemEng, Університет Вайкато, Окленд, Нова Зеландія
П. Стехлік, PhD, проф., Директор Технологічного університету Брно (Чеська республіка)
Панос Сеферліс, PhD, проф., університет Арістотеля в Салоніках, Греція

Журнал включений до зовнішніх інформаційних систем, у тому числі до бібліографічної бази даних OCLC WorldCat (США), індексується пошуковими системами Google Scholar і Crossref; зареєстрований у світовому каталозі періодичних видань бази даних Ulrich's Periodicals Directory (New Jersey, USA).

Офіційний сайт видання: <http://ite.khpi.edu.ua>

EDITORIAL BOARD

The editor-in-chief

L. L. Tovazhnyanskyi, Corresponding Member of the NAS of Ukraine, Doctor of Technical Sciences, Professor, NTU "KhPI"

Technical editor

K. O. Gorbunov, PhD, Assistant Professor, professor NTU "KhPI"

THE MEMBERS OF THE EDITORIAL BOARD:

O. P. Arsenyeva, Doctor of Technical Sciences, Prof., O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv
V. E. Ved, Doctor of Technical Sciences, Prof., NTU "KhPI"
P. O. Nekrasov, Doctor of Technical Sciences, Prof., NTU "KhPI"
P. O. Kachanov, Doctor of Technical Sciences, Prof., NTU "KhPI"
M. P. Kundenko, Doctor of Technical sciences, Prof., Head of Heat engineering and energy efficient technologies department NTU "KhPI"
V. V. Starikov, Doctor of Technical sciences, Assistant Professor, Head of Technical Cryophysics Department NTU "KhPI"
G. L. Khavin, Doctor of Technical Sciences, Prof., NTU "KhPI"
A. M. Hanzha, Doctor of Technical Sciences, Prof., NTU "KhPI"
O. B. Anipko, Doctor of Technical Sciences, Prof., Kozhedub Kharkiv Air Force University
V. A. Malyarenko, Doctor of Technical Sciences, Prof., Kharkov National University of Municipal Economy named after O. M. Beketova
V. V. Lebediev, Doctor of Technical Sciences, Assistant Professor, NTU "KhPI"
P. O. Kapustenko, PhD, professor NTU "KhPI"
Ferenc Friedler, PhD, professor, Pázmány Péter Catholic University, Budapest, Hungary
Sharifah Rafidah Wan Alwi, PhD, professor, Universiti Teknologi Malaysia
David J. Kukulka, PhD, professor, State University of New York College at Buffalo, USA
Eugeniy Kenig, prof., dr.-ing., Paderborn University, Germany
Martin Picón Núñez, PhD, professor, university of Guanajuato, Mexico
Petar Sabevarbanov, Senior Researcher, NETME Centre - SPIL, BRNO University of Technology, Czech Republic
Michael Walmsley, BE, PhD ChemEng, University of Waikato, New Zealand
Petr Stehlik, PhD, professor, Director of Institute Brno University of Technology, Czech Republic
Panos Seferlis, PhD, professor, Aristotle University of Thessaloniki, Thessaloniki, Greece

АДРЕСА РЕДКОЛЕГІЇ:

61002, м. Харків, вул. Кирпичова, 2
Тел. 70-76-958

ЗМІСТ

ЕНЕРГЕТИКА ТЕПЛОТЕХНОЛОГІЙ ТА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

<i>Koroviaka Yevhenii, Khomenko Volodymyr, Ihnatov Andrii</i> Application of advanced process control and real-time optimization for energy efficiency in oil refining.....	3
<i>Селіхов Ю. А., Перемот К. В., Нагорний Е. Р., Пільник І. В., Рись В. Г.</i> Моделювання роботи теплового насосу для комфортного життєзабезпечення багатоповерхового будинку.....	17

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ПРОМИСЛОВОГО ОБЛАДНАННЯ

<i>Грудка Б. Г.</i> Зріджувач водню з неоновим криогенним рефрижератором.....	29
<i>Мірошніченко Д. В., Лисенко Л. А., Жаров С. Л., Квасов О. В., Кузін Д. К., Марченко В. В., Набока С. А.</i> Хімічна технологія та корозійна поведінка промислових систем лакофарбових покриттів «грунт-емаль» на вуглецевій сталі.....	42
<i>Pashchenko Oleksandr, Sudakov Andrii, Rastsvietaiev Valerii, Yavorska Viktoriia</i> Application of laser scanning and 3D modeling for determination of geometric parameters of oil product reservoirs.....	55

ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ ПРОМИСЛОВОСТІ

<i>Ареф'єв В. О., Іщенко А. М.</i> Інноваційна технологія виробництва периклазошпінельних матеріалів.....	68
<i>Борисенко О. М., Горбунов К. О., Логвінков С. М., Шабанова Г. М.</i> Розрахунки температур та складів евтектик полікомпонентних перерізів системи ZrO_2-TiO_2-MgO	76
<i>Борисенко М. О., Сінкевич І. В.</i> Інноваційні шліфувально-полірувальні пасти на основі скляного абразиву та полімерного воску.....	84
<i>Ходаков О. Л., Саркісян Г. О., Василюк О. В., Мірошніченко О. М., Афанасьєва Т. М., Ткаченко Л. О., Ковальчук І. Г.</i> Вивчення впливу технології на якість червоних міцних вин спеціального типу (стиль портвейну) в умовах Одеського регіону.....	98
<i>Кануннікова Н. О., Шестопалов О. В., Сакун А. О., Босюк А. С., Матющенко О. В.</i> Екологічні наслідки корозії у контурах ВВЕР-1000 та підходи до їх мінімізації.....	113

СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ТА ОБРОБКИ ІНФОРМАЦІЇ

<i>Некрасов П. О., Арутюнян Д. А.</i> Сучасні методологічні підходи до аналізу переетерифікованих жирів	125
<i>Лаврова І. О., Грубник М. І., Владимиренко В. В., Корягін А. Г., Авіна С. І.</i> Природні воски як сировина для виробництва природних, екологічно безпечних та біорозкладних пакувальних матеріалів.....	135

<i>Сторінка редколегії.....</i>	145
---------------------------------	-----

Затверджено Вченою радою НТУ «ХПІ» (протокол № 5 від 27.04.2026 р.)

Інтегровані технології та енергозбереження : щоквартальний науково-практичний журнал / Нац. техн. ун-т «Харків. політехн. ін-т». – Харків : НТУ «ХПІ», 2026. – № 2. – 146 с.

Журнал наукових та науково-практичних статей з питань енергозбереження та сучасних технологій різноманітних галузей промисловості.

© Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», 2026

Yevhenii Koroviaka, candidate of technical sciences, associate professor,
Volodymyr Khomenko, candidate of technical sciences, associate professor,
Andrii Ihnatov, candidate of technical sciences, associate professor

APPLICATION OF ADVANCED PROCESS CONTROL AND REAL-TIME OPTIMIZATION FOR ENERGY EFFICIENCY IN OIL REFINING

Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

Keywords: advanced process control, model predictive control, real-time optimization, energy efficiency, oil refining, crude distillation unit, fired heaters, digital twin.

Introduction. The global refining industry is currently undergoing a profound transformation driven by the dual imperative of enhancing economic performance while significantly reducing environmental impact [1, 2]. Increasing volatility in energy markets, coupled with stringent environmental regulations and global decarbonization goals, has intensified the need for refineries to optimize their energy usage. Energy expenditures constitute a substantial proportion—typically ranging from 30 % to 50 %—of total operating costs in refining processes [3, 4]. Major energy consumers include fired heaters, compressors, and pumping systems, which are integral to maintaining process continuity but often operate below optimal efficiency due to legacy control strategies [5, 6].

In many conventional refinery setups, process control is predominantly based on decentralized regulatory control loops supplemented by intermittent manual interventions [7, 8]. While such approaches may ensure basic operational stability, they are inherently limited in their ability to handle multivariable interactions, process nonlinearities, and dynamic disturbances [9, 10]. As a result, these systems frequently operate under conservative setpoints, leading to increased energy consumption, reduced throughput efficiency, and elevated greenhouse gas emissions [11, 12]. The growing complexity of modern refining units—characterized by tightly coupled process variables, nonlinear kinetics, and fluctuating feedstock properties—renders traditional control methodologies increasingly inadequate [13].

In response to these challenges, advanced process control (APC), particularly model predictive control (MPC), has emerged as a robust and widely adopted solution. MPC leverages dynamic mathematical models of the process to forecast future system behavior over a defined prediction horizon [14]. By solving a constrained optimization problem in real time, MPC determines optimal adjustments to manipulated variables, ensuring adherence to operational constraints while maximizing performance objectives [15]. This predictive capability enables more precise control of key process parameters, reduces variability, and enhances energy efficiency [16].

The integration of MPC with real-time optimization (RTO) further extends these benefits by aligning operational control with economic objectives. RTO systems periodically compute optimal operating targets based on current process conditions, feedstock characteristics, and prevailing market prices [17, 18]. By continuously updating these targets and feeding them to the MPC layer, the combined APC–RTO framework ensures that refinery operations are not only stable and safe but also economically optimal [19]. This hierarchical control architecture facilitates coordinated decision-making across multiple process units, thereby unlocking additional efficiency gains [20].

Furthermore, regulatory frameworks such as the EU Emissions Trading System and various national energy efficiency directives provide strong incentives for refineries to adopt advanced optimization technologies [21]. Compliance with these regulations often necessitates measurable reductions in carbon intensity and energy consumption, which can be effectively achieved through APC and RTO implementation [22, 23]. At the same time, technological advancements—including the proliferation of online analyzers, improvements in process simulation accuracy, and the development of robust industrial data infrastructures—have significantly lowered the barriers to deploying such systems at scale [24, 25].

Consequently, the relevance of this research is underscored by its focus on the systematic application of APC and RTO methodologies to key refining units [26]. By demonstrating how these advanced control strategies can be effectively implemented to enhance energy efficiency, reduce emissions, and improve economic performance, the study contributes to the broader objective of sustainable refinery operation in an increasingly constrained energy and environmental landscape [27].

Collectively, the literature indicates that APC and RTO are mature technologies with proven benefits, yet their adoption requires a systematic framework that accounts for process dynamics, model accuracy, and economic objectives. This article aims to provide such a framework with a focus on energy efficiency.

The main part. The purpose of this article is to propose a structured approach for implementing advanced process control and real-time optimization to improve energy efficiency in oil refining. The study describes the architecture, key components, and practical benefits of APC/RTO systems, supported by case studies in crude distillation, fluid catalytic cracking, and fired heaters [28, 29]. The research also identifies critical success factors and future directions for further enhancing energy performance.

The proposed APC/RTO framework is built upon a hierarchical structure that separates control actions by time scale and scope. Figure 1 illustrates the typical architecture, consisting of three layers: the regulatory control layer (basic PID loops), the multivariable predictive control layer (MPC), and the real-time optimization layer. Each layer operates at a different frequency, with the RTO typically updating economic targets every 1-4 hours, the MPC executing every 1-5 minutes, and the regulatory loops acting at sub-second to second intervals. This separation ensures that fast disturbances are handled by the lowest layer, while economic optimization is performed at a slower pace that aligns with the time constants of feed changes and market price updates.

Figure 1 shows the flow of information: plant measurements are passed to the regulatory layer, then to the MPC, which sends setpoints to the regulatory controllers. The RTO uses reconciled plant data, a rigorous process model, and economic prices to compute optimal operating points, which are then passed to the MPC as targets. The figure also highlights the role of online analyzers and the data reconciliation block that ensures consistent material and energy balances. Online analyzers (e.g., gas chromatographs, near-infrared spectrometers) provide frequent measurements of product qualities, enabling the control system to respond to composition changes without relying on delayed laboratory results.

Data reconciliation and gross error detection form the foundation of accurate real-time optimization. Raw field measurements inevitably contain random noise, biases, and occasional gross errors from sensor malfunction or process leaks. Data reconciliation uses a steady-state process model – typically a set of mass and energy balance equations – to adjust the measurements minimally so that they satisfy the balances.

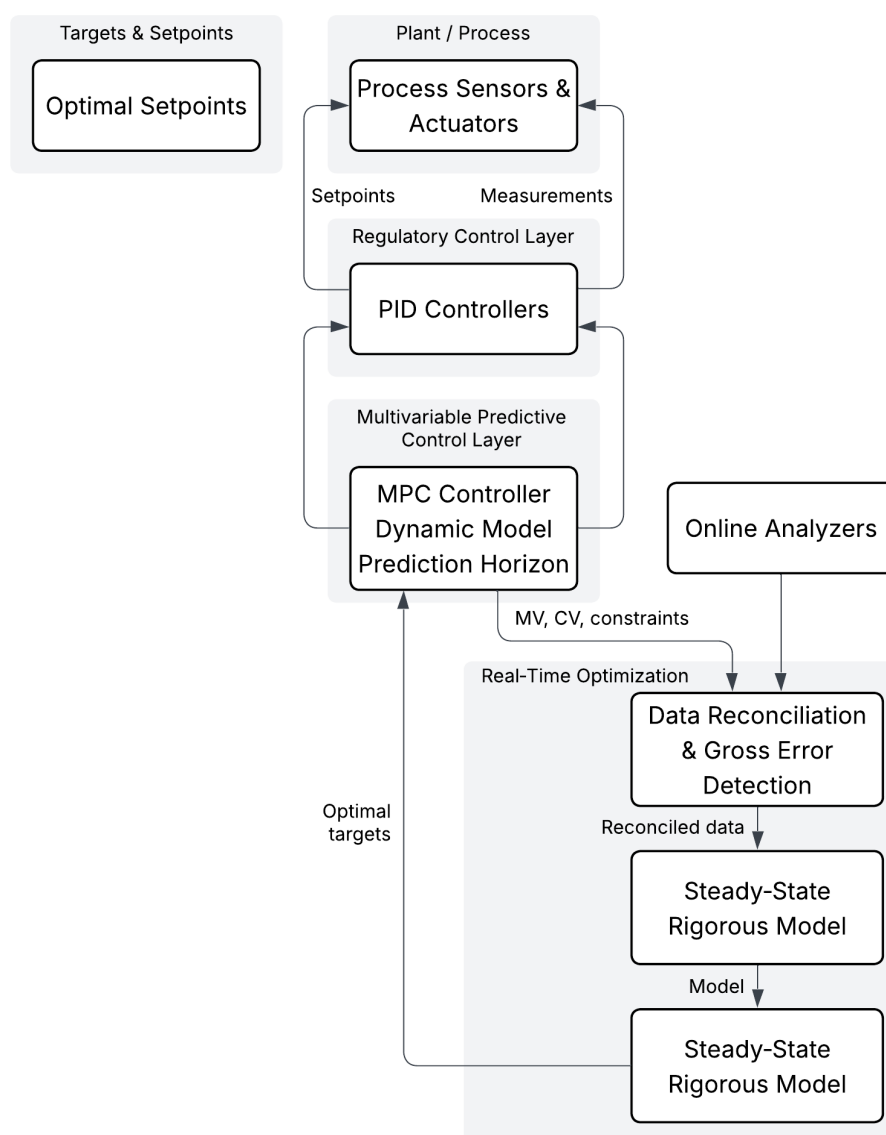


Figure 1 – Hierarchical Architecture of APC and RTO

The reconciled values are statistically optimal estimates that remove inconsistencies and provide a reliable snapshot of the process state. Gross error detection identifies faulty sensors or process leaks by analyzing the residuals between measured and reconciled values. For a crude distillation unit, reconciliation ensures that the yields of products, the heat duties of furnaces and exchangers, and the product qualities are correctly estimated before the optimization is performed. Without this step, the RTO would base its decisions on inconsistent data, potentially leading to suboptimal or even infeasible targets.

Model predictive control (MPC) is the core of the multivariable predictive control layer. The MPC uses a dynamic linear or nonlinear model of the process to predict future outputs over a prediction horizon (typically 30-120 minutes) and computes manipulated variable moves that minimize a quadratic objective while respecting constraints. For energy efficiency, the objective may include minimizing fuel gas consumption, steam usage, or electricity. Common controlled variables include product qualities (e.g., 95 % point of naphtha, flash

point of diesel) and energy-related variables such as furnace outlet temperature, reflux ratios, and pumparound duties. The manipulated variables are typically feed rate, setpoints of flow controllers, and air/fuel ratio in furnaces. By explicitly handling interactions – for example, the effect of reflux ratio on both product purity and reboiler duty – and by respecting constraints (e.g., maximum column pressure drop, minimum furnace stack temperature), the MPC can push the process closer to its operational limits without violating safety or quality boundaries. The controller is executed every minute or faster, allowing it to correct disturbances such as feed rate variations or ambient temperature changes before they affect product quality.

Real-time optimization operates at a slower frequency, typically every 1-4 hours. It solves a steady-state optimization problem using a rigorous nonlinear process model, often built from first-principles thermodynamics and equipment performance equations. The objective is to maximize an economic function, which for energy efficiency is often expressed as:

$$\max_u \left(\sum_j p_j y_j(u, d) - c_{fuel} F_{fuel}(u, d) - c_{steam} S(u, d) - c_{elec}(u, d) \right), \quad (1)$$

where p_j are product prices, y_j are yields predicted by the model, F_{fuel} is fuel consumption, S is steam consumption, E is electricity consumption, and d are disturbances (feedstock properties, ambient temperature). Constraints include product specifications (e.g., maximum sulfur content, minimum flash point), equipment limits (e.g., maximum furnace firing, column pressure drop, compressor surge limits), and safety margins. The optimization is repeated periodically, and the optimal setpoints (e.g., furnace outlet temperature, reflux ratio) are sent to the MPC as targets. This closed-loop arrangement ensures that the plant is continuously driven toward the true economic optimum, even as feedstocks and prices change.

Case study 1: Crude distillation unit. A European refinery implemented APC and RTO on its 150,000 bbl/day crude unit. The project involved upgrading the DCS, installing online analyzers for key product qualities (naphtha 95 % point, diesel flash point), and deploying a rigorous CDU model for RTO. The MPC controlled the preheat train, furnace, and column with 12 manipulated variables and 18 controlled variables. The RTO updated targets every 4 hours based on real-time crude assay and energy prices. Over a 12-month period, the system reduced fuel gas consumption by 4.2 % and increased valuable distillate yield by 1.8 %, resulting in annual savings of over \$2 million. The improved control also reduced temperature variability in the furnace, extending tube life and reducing maintenance costs. This case illustrates how the combination of MPC and RTO can simultaneously improve both energy efficiency and yield.

Case study 2: Fluid catalytic cracking unit. A FCCU in the Middle East faced frequent upsets due to changes in catalyst activity and feed composition. The installation of an MPC that manipulated regenerator air, slide valve positions, and riser temperature, coupled with an RTO that adjusted catalyst circulation and regenerator temperature targets, stabilized the unit. Energy consumption in the air blower – a major power consumer – was reduced by 6%. Optimizing coke burning led to lower regenerator temperatures, which reduced catalyst deactivation and extended catalyst life. Moreover, the system enabled the unit to process heavier feeds without exceeding environmental limits on SO_x and NO_x emissions. The case demonstrates how MPC/RTO can improve the flexibility of processing lower-cost feeds while maintaining energy efficiency and environmental compliance.

Case study 3: Fired heaters. Fired heaters account for a large share of refinery energy use, often 30-40 % of total site energy consumption. A dedicated MPC for a furnace with

multiple passes and air preheating was implemented. The controller minimized fuel gas consumption by maintaining optimum excess oxygen (typically 2-3 %) and controlling pass outlet temperatures to within ± 2 °C. The system also included a model to predict tube skin temperatures, preventing coking and tube failures by avoiding localized overheating. Energy savings of 7 % were reported, with a payback period of less than 18 months. Figure 2 presents a schematic of this typical fired heater control configuration, showing the manipulated variables (fuel flow, air flow, pass dampers) and controlled variables (outlet temperature, excess O₂, stack temperature). The figure illustrates how the MPC handles interactions – for example, increasing air flow reduces outlet temperature and also reduces excess O₂ if fuel is not adjusted simultaneously – and respects constraints such as maximum fuel flow and minimum air flow for safe combustion.

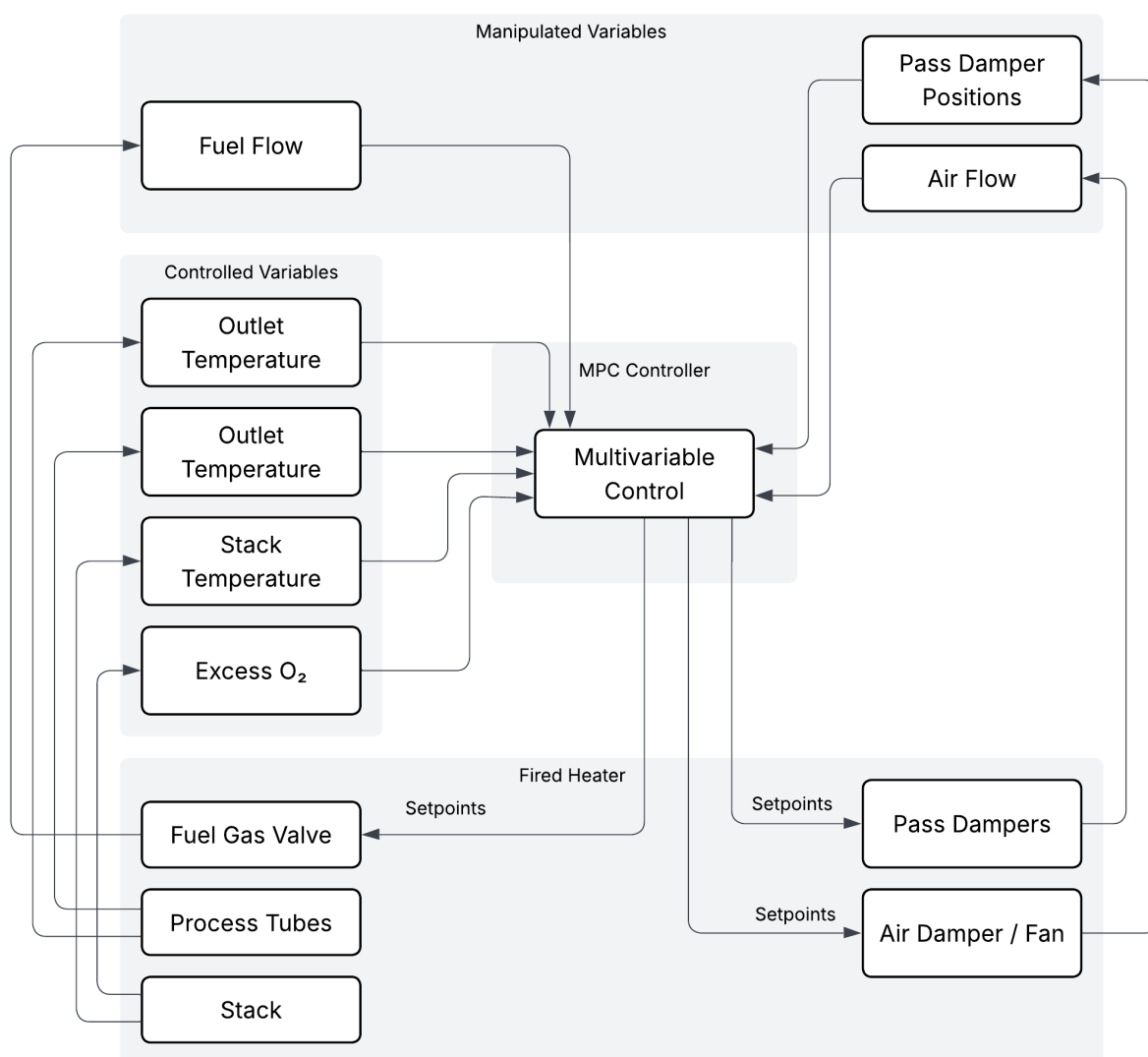


Figure 2 – Fired Heater Control Configuration with MPC

Figure 3 compares key energy indicators before and after APC/RTO implementation across the three case studies, expressed as energy intensity (gigajoules per ton of feed). The bar chart demonstrates reductions ranging from 3 % to 8 %, with the largest gains in fired heaters, which typically have the highest energy intensity and the greatest potential for im-

provement through tighter control. The results confirm that the hierarchical APC/RTO framework delivers consistent, quantifiable energy savings across diverse refining units.

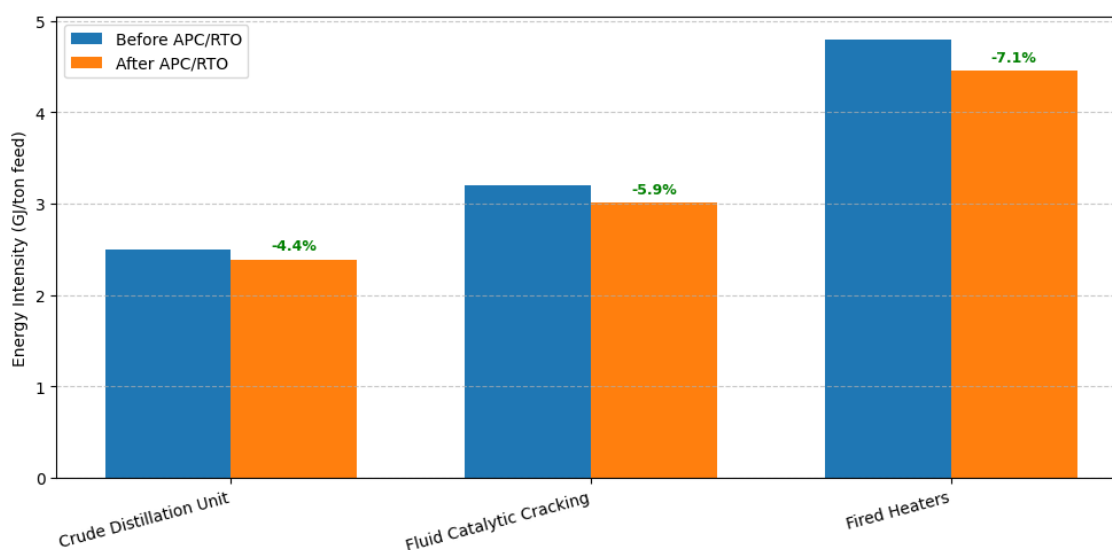


Figure 3 – Energy Efficiency Improvement with APC/RTO

Despite the proven benefits, several challenges must be addressed to ensure successful deployment and sustained performance. Model maintenance is critical; process changes such as revamps, catalyst changes, or equipment degradation degrade model accuracy over time, necessitating periodic re-identification of model parameters. Operator training is essential to build trust and ensure proper handling of control system overrides; operators must understand when to let the system run automatically and when to intervene. Integration with existing DCS and safety systems must be carefully engineered to avoid conflicts – for instance, the MPC should not violate safety interlocks. Furthermore, the economic benefit must be clearly demonstrated to justify the capital investment, which can be substantial for analyzers, controller hardware, and engineering services. Successful projects typically involve a multidisciplinary team of process engineers, control engineers, and operations personnel, and they rely on high-quality instrumentation and analyzers that are properly maintained.

The integration of machine learning with APC and RTO offers promising avenues to further enhance energy efficiency. Machine learning can be used to automatically update model parameters based on operating data, thereby reducing the maintenance burden. It can also predict feed properties from online analyzers or historical data, allowing the RTO to anticipate composition changes. Anomaly detection using machine learning can identify abnormal equipment behavior (e.g., fouling, catalyst deactivation) before it impacts performance. Digital twins – dynamic, high-fidelity simulations – can be used in place of traditional RTO models to enable more frequent updates (every few minutes instead of hours) and to simulate what-if scenarios for operational planning. Reinforcement learning is also being explored for autonomous control of energy-intensive units, where the controller learns optimal policies through interaction with the process. Additionally, the coupling of APC/RTO with carbon capture systems will become increasingly important as refineries aim to achieve net-zero emissions. Real-time optimization of energy consumption and CO₂ capture rates, balancing fuel savings against carbon credit prices, will be a key capability of future integrated systems. The continued evolution of these technologies promises to further close the gap between actu-

al plant performance and theoretical economic optimum, driving the refining industry toward greater sustainability.

Figure 3 compares key energy indicators before and after APC/RTO implementation across the three case studies, expressed as energy intensity (GJ per ton of feed). The bar chart demonstrates reductions ranging from 3 % to 8 %, with the largest gains in fired heaters.

Despite the proven benefits, several challenges must be addressed. Model maintenance is critical; process changes (e.g., revamps, catalyst changes) degrade model accuracy over time, necessitating periodic re-identification. Operator training is essential to build trust and ensure proper handling of control system overrides. Integration with existing DCS and safety systems must be carefully engineered to avoid conflicts. Furthermore, the economic benefit must be clearly demonstrated to justify the capital investment. Successful projects typically involve a multidisciplinary team of process engineers, control engineers, and operations personnel, and they rely on high-quality instrumentation and analyzers.

The integration of machine learning with APC and RTO offers promising avenues. Machine learning can be used to automatically update model parameters based on operating data, to predict feed properties, and to detect abnormal events. Digital twins – dynamic, high-fidelity simulations – can be used in place of traditional RTO models to enable more frequent updates and to simulate what-if scenarios. Reinforcement learning is also being explored for autonomous control of energy-intensive units. Additionally, the coupling of APC/RTO with carbon capture systems will become increasingly important as refineries aim to achieve net-zero emissions.

Conclusions and prospects for further research. The application of advanced process control and real-time optimization represents a mature, proven strategy for enhancing energy efficiency in oil refining operations. The hierarchical architecture that underpins this approach—comprising a regulatory control layer of basic PID loops, a multivariable predictive control layer using model predictive control, and a steady-state real-time optimization layer—provides a structured framework that aligns control actions with the characteristic time scales of process dynamics. This separation of responsibilities ensures that fast disturbances are handled locally while economic optimization is performed at a frequency consistent with changes in feedstock properties and market prices, allowing the plant to be continuously operated near its true economic optimum.

The case studies presented in this article confirm the tangible benefits of this integrated approach. In a crude distillation unit, the combination of MPC and RTO reduced fuel gas consumption by 4.2 % while simultaneously increasing valuable distillate yield by 1.8 %, demonstrating that energy efficiency and yield improvement are not mutually exclusive objectives. In a fluid catalytic cracking unit, the implementation of APC/RTO stabilized operation against feed and catalyst variations, reducing air blower energy consumption by 6 % and enabling the processing of heavier, lower-cost feeds without exceeding environmental limits. For fired heaters, which represent the single largest energy consumers in most refineries, dedicated MPC achieved energy savings of 7 % by maintaining optimum excess oxygen and tight control of pass outlet temperatures, while also protecting against tube overheating and coking. These results collectively illustrate that the hierarchical framework delivers consistent, quantifiable improvements across diverse process units.

Beyond the direct energy savings, the implementation of such systems yields additional benefits that are critical for modern refining operations. Improved control reduces variability, which in turn allows operation closer to constraints without compromising safety or product quality. Reduced temperature cycling extends equipment life and lowers maintenance costs. Enhanced stability enables operators to confidently process a wider range of feedstocks,

improving refinery flexibility in response to changing crude markets. Moreover, the rigorous process models and data reconciliation infrastructure built for APC and RTO provide a foundation for other digital initiatives, including predictive maintenance and advanced analytics.

However, the successful deployment and sustained performance of these systems depend on several critical factors. The accuracy of the process models must be maintained over time through periodic re-identification or adaptive updating, as equipment degradation, catalyst changes, and process revamps inevitably introduce deviations. High-quality instrumentation and online analyzers are essential; unreliable measurements lead to suboptimal control and erode operator trust. Equally important is the human element: operators must be thoroughly trained to understand the system's behavior, to recognize when automatic control is functioning correctly, and to intervene appropriately during abnormal situations. Successful projects consistently involve close collaboration between process engineers, control engineers, and operations personnel, supported by management commitment to the long-term value of advanced control.

Looking forward, several promising research directions will further enhance the capabilities of APC and RTO. One key area is the reduction of model maintenance effort through adaptive and self-learning modeling techniques. Machine learning algorithms that continuously update model parameters using operational data can significantly reduce the engineering burden associated with periodic re-identification. Hybrid models that combine first-principles knowledge with data-driven components offer particular promise, as they can extrapolate beyond the range of historical data while still learning from new operating points.

The integration of machine learning for predictive capabilities will also expand the scope of optimization. Advanced prediction of feed properties using near-infrared spectroscopy combined with neural networks can enable the RTO to anticipate composition changes rather than react to them. Similarly, models that forecast fouling rates in heat exchangers, catalyst deactivation in FCC units, or coking in fired heaters can inform proactive maintenance scheduling and incorporate these degradation effects directly into the optimization objective, balancing immediate energy savings against long-term equipment life.

Digital twin platforms represent a natural evolution of the current RTO infrastructure. Unlike traditional steady-state RTO models, digital twins are dynamic, high-fidelity simulations that run continuously in parallel with the physical plant. They can be used to perform what-if scenario analysis, to test the impact of operational changes before implementation, and to enable more frequent (e.g., every few minutes) optimization updates. When coupled with machine learning for parameter estimation, digital twins can maintain accuracy even under rapidly changing conditions.

As the refining industry faces increasing pressure to reduce carbon emissions, the role of advanced control will expand beyond traditional energy efficiency to encompass optimization of the energy-carbon trade-off. Real-time optimization that balances fuel consumption against carbon credit prices, or that minimizes emissions subject to fuel cost constraints, will become standard. Integration with carbon capture and storage (CCS) units will require coordinated control of the capture process alongside the core refining units. Furthermore, as refineries begin to incorporate renewable energy sources such as solar or wind power for electrical loads, APC systems will need to manage the variability of these sources while maintaining stable operation.

Finally, the convergence of process control, artificial intelligence, and digitalization is laying the groundwork for the next generation of autonomous refineries. Reinforcement learning—where controllers learn optimal policies through direct interaction with the process—offers the potential for systems that continuously improve their performance without explicit model

identification. While such approaches are still in early stages of development, they represent a long-term vision of truly self-optimizing plants that adapt autonomously to changing conditions. The continued advancement of these technologies, combined with sustained commitment to implementation best practices, will ensure that APC and RTO remain essential tools for achieving safe, efficient, and sustainable refining operations in the decades ahead.

Література

1. Seijo-Bestilleiro E., Arias-Fernández I., Carro-López D., Naveiro M. Opportunities for Emission Reduction in the Transformation of Petroleum Refining. *Fuels*. 2025. Vol. 6, Iss. 3. P. 66. DOI: <https://doi.org/10.3390/fuels6030066>.
2. Griffiths S., Sovacool B., Kim J. [et al.]. Decarbonizing the oil refining industry: A systematic review of sociotechnical systems, technological innovations, and policy options. *Energy Research & Social Science*. 2022. Vol. 89. Art. 102542. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.erss.2022.102542>.
3. Rissman J., Bataille C., Masanet E. [et al.]. Technologies and policies to decarbonize global industry: Review and assessment of mitigation drivers through 2070. *Applied Energy*. 2020. Vol. 266. Art. 114848. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114848>.
4. Yılbaş Z. Biofuels, E-Fuels, and Waste-Derived Fuels: Advances, Challenges, and Future Directions. *Sustainability*. 2025. Vol. 17, Iss. 13. Art. 6145. DOI: <https://doi.org/10.3390/su17136145>.
5. Salomone D. Advanced strategies for the efficient optimization and control of industrial compressed air systems. *Results in Engineering*. 2025. Vol. 26. Art. 105429. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.105429>.
6. Jørgensen B. N., Ma Z. G. Energy Efficiency and Decarbonization Strategies in Buildings: A Review of Technologies, Policies, and Future Directions. *Applied Sciences*. 2025. Vol. 15, Iss. 21. Art. 11660. DOI: <https://doi.org/10.3390/app152111660>.
7. Fahsyar P., Ismail Z. Decentralized Energy Management Using Multi-Agent Systems for Remote Hybrid Power Systems. *IntechOpen*. 2026. DOI: <https://doi.org/10.5772/intechopen.1014778>.
8. Ranaboldo M., Aragüés-Peñalba M., Arica E. [et al.]. A comprehensive overview of industrial demand response status in Europe. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2024. Vol. 203. Art. 114797. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114797>.
9. Zhang F., Li Z., Ma C. [et al.]. Hybrid model predictive and active disturbance rejection control for robust and efficient control of extractive distillation process. *Chemical Engineering Science*. 2026. Vol. 320. Art. 122676. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ces.2025.122676>.
10. Rojas L., Yepes V., Garcia J. Complex Dynamics and Intelligent Control: Advances, Challenges, and Applications in Mining and Industrial Processes. *Mathematics*. 2025. Vol. 13, Iss. 6. Art. 961. DOI: <https://doi.org/10.3390/math13060961>.
11. Lin T.-Y., Chiu Y.-H., Chen C.-H., Ji L. Renewable energy consumption efficiency, greenhouse gas emission efficiency, and climate change in Europe. *Geoenergy Science and Engineering*. 2025. Vol. 247. Art. 213665. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoen.2025.213665>.
12. Oltulular S. Energy Efficiency and Environmental Technologies in Carbon Emissions Reduction Strategies for a Sustainable Future: Estimation Through Simultaneous Equation Systems. *Energies*. 2025. Vol. 18, Iss. 14. Art. 3596. DOI: <https://doi.org/10.3390/en18143596>.

13. Song M.-K., Kim D.-W., Mohanty S. [et al.]. Energy-efficient machine learning approaches for enhanced biofuel (Biodiesel) production: A review. *Energy and AI*. 2026. Vol. 24. Art. 100696. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egyai.2026.100696>.
14. Yu Z., Long J. Review on Advanced Model Predictive Control Technologies for High-Power Converters and Industrial Drives. *Electronics*. 2024. Vol. 13, Iss. 24. Art. 4969. DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics13244969>.
15. Wei Z., Tien P. W., Calautit J. [et al.]. Investigation of a model predictive control (MPC) strategy for seasonal thermochemical energy storage systems in district heating networks. *Applied Energy*. 2024. Vol. 376. Art. 124164. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.124164>.
16. Tomažič S., Škrjanc I. Advanced model predictive control strategies for energy-efficient HVAC systems in pharmaceutical facilities. *Energy and Buildings*. 2025. Vol. 347. Art. 116348. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2025.116348>.
17. Zanin A., Gouvêa M., Odloak D. Integrating real-time optimization into the model predictive controller of the FCC system. *Control Engineering Practice*. 2002. Vol. 10. P. 819–831. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0967-0661\(02\)00033-3](https://doi.org/10.1016/S0967-0661(02)00033-3).
18. De Prada C., Sarabia D., Gutierrez G. [et al.]. Integration of RTO and MPC in the Hydrogen Network of a Petrol Refinery. *Processes*. 2017. Vol. 5, Iss. 1. Art. 3. DOI: <https://doi.org/10.3390/pr5010003>.
19. Pontes K., Wolf I., Embirucu M., Marquardt W. Dynamic Real-Time Optimization of Industrial Polymerization Processes with Fast Dynamics. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2015. Vol. 54. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.5b00909>.
20. Abdelhadi H., Mahmoud A. M., Saied E. M. M., Mohamed M. A. E. Innovative hierarchical control of multiple microgrids: Cheetah meets PSO. *Energy Reports*. 2024. Vol. 11. P. 4967–4981. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2024.04.055>.
21. Mańkowski K., Bajan B., Mrówczyńska-Kamińska A. Renewable energy in EU agribusiness: Review of progress in meeting 2030 renewable energy directive III targets. *Energy Reports*. 2026. Vol. 15. Art. 109031. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2025.109031>.
22. Wang J., Li H., Wang C., Ren W. The Impact of Dual Environmental Regulations on Carbon Intensity: A Global Perspective. *Sustainability*. 2025. Vol. 17, Iss. 4. Art. 1446. DOI: <https://doi.org/10.3390/su17041446>.
23. Shen Y. The power of market regulation: analyzing the impact of energy use rights trading policies on low-carbon transformation. *Sustainable Energy Research*. 2026. Vol. 13. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40807-025-00235-2>.
24. Khan M. I., Yasmeen T., Khan M. [et al.]. Integrating industry 4.0 for enhanced sustainability: Pathways and prospects. *Sustainable Production and Consumption*. 2025. Vol. 54. P. 149–189. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.spc.2024.12.012>.
25. Cavus M. Advancing Power Systems with Renewable Energy and Intelligent Technologies: A Comprehensive Review on Grid Transformation and Integration. *Electronics*. 2025. Vol. 14, Iss. 6. Art. 1159. DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics14061159>.
26. Bauer M., Craig I. Economic Assessment of Advanced Process Control—A Survey and Framework. *Journal of Process Control*. 2008. Vol. 18. P. 2–18. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jprocont.2007.05.007>.
27. Ramírez-Márquez C., Ponce-Ortega J. M., Segovia-Hernández J. G., Hernández S. Process intensification control: Advancing efficiency and sustainability, a review. *Chemical Engineering and Processing – Process Intensification*. 2025. Vol. 216. Art. 110388. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cep.2025.110388>.

28. Li H., Zhao Q., Wang R. [et al.]. Integrated Hybrid Modelling and Surrogate Model-Based Operation Optimization of Fluid Catalytic Cracking Process. *Processes*. 2024. Vol. 12, Iss. 11. Art. 2474. DOI: <https://doi.org/10.3390/pr12112474>.

29. Sánchez R., Palencia-Díaz A., Fábregas-Villegas J., Velilla-Díaz W. Fired Heaters Optimization by Estimating Real-Time Combustion Products Using Numerical Methods. *Energies*. 2024. Vol. 17, Iss. 23. Art. 6190. DOI: <https://doi.org/10.3390/en17236190>.

Bibliography (transliterated)

1. Seijo-Bestilleiro E., Arias-Fernández I., Carro-López D., Naveiro M. Opportunities for Emission Reduction in the Transformation of Petroleum Refining. *Fuels*. 2025. Vol. 6, Iss. 3. P. 66. DOI: <https://doi.org/10.3390/fuels6030066>.

2. Griffiths S., Sovacool B., Kim J. [et al.]. Decarbonizing the oil refining industry: A systematic review of sociotechnical systems, technological innovations, and policy options. *Energy Research & Social Science*. 2022. Vol. 89. Art. 102542. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.erss.2022.102542>.

3. Rissman J., Bataille C., Masanet E. [et al.]. Technologies and policies to decarbonize global industry: Review and assessment of mitigation drivers through 2070. *Applied Energy*. 2020. Vol. 266. Art. 114848. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114848>.

4. Yılbaş Z. Biofuels, E-Fuels, and Waste-Derived Fuels: Advances, Challenges, and Future Directions. *Sustainability*. 2025. Vol. 17, Iss. 13. Art. 6145. DOI: <https://doi.org/10.3390/su17136145>.

5. Salomone D. Advanced strategies for the efficient optimization and control of industrial compressed air systems. *Results in Engineering*. 2025. Vol. 26. Art. 105429. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.105429>.

6. Jørgensen B. N., Ma Z. G. Energy Efficiency and Decarbonization Strategies in Buildings: A Review of Technologies, Policies, and Future Directions. *Applied Sciences*. 2025. Vol. 15, Iss. 21. Art. 11660. DOI: <https://doi.org/10.3390/app152111660>.

7. Fahsyar P., Ismail Z. Decentralized Energy Management Using Multi-Agent Systems for Remote Hybrid Power Systems. *IntechOpen*. 2026. DOI: <https://doi.org/10.5772/intechopen.1014778>.

8. Ranaboldo M., Aragüés-Peñalba M., Arica E. [et al.]. A comprehensive overview of industrial demand response status in Europe. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2024. Vol. 203. Art. 114797. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114797>.

9. Zhang F., Li Z., Ma C. [et al.]. Hybrid model predictive and active disturbance rejection control for robust and efficient control of extractive distillation process. *Chemical Engineering Science*. 2026. Vol. 320. Art. 122676. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ces.2025.122676>.

10. Rojas L., Yepes V., Garcia J. Complex Dynamics and Intelligent Control: Advances, Challenges, and Applications in Mining and Industrial Processes. *Mathematics*. 2025. Vol. 13, Iss. 6. Art. 961. DOI: <https://doi.org/10.3390/math13060961>.

11. Lin T.-Y., Chiu Y.-H., Chen C.-H., Ji L. Renewable energy consumption efficiency, greenhouse gas emission efficiency, and climate change in Europe. *Geoenergy Science and Engineering*. 2025. Vol. 247. Art. 213665. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoen.2025.213665>.

12. Oltulular S. Energy Efficiency and Environmental Technologies in Carbon Emissions Reduction Strategies for a Sustainable Future: Estimation Through Simultaneous Equa-

tion Systems. *Energies*. 2025. Vol. 18, Iss. 14. Art. 3596. DOI: <https://doi.org/10.3390/en18143596>.

13. Song M.-K., Kim D.-W., Mohanty S. [et al.]. Energy-efficient machine learning approaches for enhanced biofuel (Biodiesel) production: A review. *Energy and AI*. 2026. Vol. 24. Art. 100696. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egyai.2026.100696>.

14. Yu Z., Long J. Review on Advanced Model Predictive Control Technologies for High-Power Converters and Industrial Drives. *Electronics*. 2024. Vol. 13, Iss. 24. Art. 4969. DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics13244969>.

15. Wei Z., Tien P. W., Calautit J. [et al.]. Investigation of a model predictive control (MPC) strategy for seasonal thermochemical energy storage systems in district heating networks. *Applied Energy*. 2024. Vol. 376. Art. 124164. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.124164>.

16. Tomažič S., Škrjanc I. Advanced model predictive control strategies for energy-efficient HVAC systems in pharmaceutical facilities. *Energy and Buildings*. 2025. Vol. 347. Art. 116348. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2025.116348>.

17. Zanin A., Gouvêa M., Odloak D. Integrating real-time optimization into the model predictive controller of the FCC system. *Control Engineering Practice*. 2002. Vol. 10. P. 819–831. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0967-0661\(02\)00033-3](https://doi.org/10.1016/S0967-0661(02)00033-3).

18. De Prada C., Sarabia D., Gutierrez G. [et al.]. Integration of RTO and MPC in the Hydrogen Network of a Petrol Refinery. *Processes*. 2017. Vol. 5, Iss. 1. Art. 3. DOI: <https://doi.org/10.3390/pr5010003>.

19. Pontes K., Wolf I., Embiruçu M., Marquardt W. Dynamic Real-Time Optimization of Industrial Polymerization Processes with Fast Dynamics. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2015. Vol. 54. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.5b00909>.

20. Abdelhadi H., Mahmoud A. M., Saied E. M. M., Mohamed M. A. E. Innovative hierarchical control of multiple microgrids: Cheetah meets PSO. *Energy Reports*. 2024. Vol. 11. P. 4967–4981. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2024.04.055>.

21. Mańkowski K., Bajan B., Mrówczyńska-Kamińska A. Renewable energy in EU agribusiness: Review of progress in meeting 2030 renewable energy directive III targets. *Energy Reports*. 2026. Vol. 15. Art. 109031. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2025.109031>.

22. Wang J., Li H., Wang C., Ren W. The Impact of Dual Environmental Regulations on Carbon Intensity: A Global Perspective. *Sustainability*. 2025. Vol. 17, Iss. 4. Art. 1446. DOI: <https://doi.org/10.3390/su17041446>.

23. Shen Y. The power of market regulation: analyzing the impact of energy use rights trading policies on low-carbon transformation. *Sustainable Energy Research*. 2026. Vol. 13. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40807-025-00235-2>.

24. Khan M. I., Yasmeen T., Khan M. [et al.]. Integrating industry 4.0 for enhanced sustainability: Pathways and prospects. *Sustainable Production and Consumption*. 2025. Vol. 54. P. 149–189. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.spc.2024.12.012>.

25. Cavus M. Advancing Power Systems with Renewable Energy and Intelligent Technologies: A Comprehensive Review on Grid Transformation and Integration. *Electronics*. 2025. Vol. 14, Iss. 6. Art. 1159. DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics14061159>.

26. Bauer M., Craig I. Economic Assessment of Advanced Process Control—A Survey and Framework. *Journal of Process Control*. 2008. Vol. 18. P. 2–18. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jprocont.2007.05.007>.

27. Ramírez-Márquez C., Ponce-Ortega J. M., Segovia-Hernández J. G., Hernández S. Process intensification control: Advancing efficiency and sustainability, a review. *Chemical*

Engineering and Processing – Process Intensification. 2025. Vol. 216. Art. 110388. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cep.2025.110388>.

28. Li H., Zhao Q., Wang R. [et al.]. Integrated Hybrid Modelling and Surrogate Model-Based Operation Optimization of Fluid Catalytic Cracking Process. *Processes*. 2024. Vol. 12, Iss. 11. Art. 2474. DOI: <https://doi.org/10.3390/pr12112474>.

29. Sánchez R., Palencia-Díaz A., Fábregas-Villegas J., Velilla-Díaz W. Fired Heaters Optimization by Estimating Real-Time Combustion Products Using Numerical Methods. *Energies*. 2024. Vol. 17, Iss. 23. Art. 6190. DOI: <https://doi.org/10.3390/en17236190>.

UDK 665.6:681.5

Yevhenii Koroviaka, candidate of technical sciences, associate professor,
Volodymyr Khomenko, candidate of technical sciences, associate professor,
Andrii Ihnatov, candidate of technical sciences, associate professor

APPLICATION OF ADVANCED PROCESS CONTROL AND REAL-TIME OPTIMIZATION FOR ENERGY EFFICIENCY IN OIL REFINING

Energy consumption constitutes one of the largest operating expenses in oil refining, and its reduction is critical for both economic performance and environmental compliance. Traditional regulatory control systems, however, are unable to maintain process operations at the true optimum under varying feedstocks and market conditions. This article explores the application of advanced process control (APC) and real-time optimization (RTO) technologies to improve energy efficiency in refining units. The integration of model predictive control (MPC) with rigorous process models, online analyzers, and economic optimization is examined. A hierarchical architecture is presented, comprising regulatory control, multivariable predictive control, and steady-state RTO layers. The role of real-time data reconciliation, gross error detection, and model updating is emphasized. Case studies from crude distillation units (CDU), fluid catalytic cracking (FCC) regenerators, and fired heaters demonstrate energy savings of 3-8% and significant reductions in greenhouse gas emissions. The paper also discusses implementation challenges, including model maintenance, operator training, and integration with existing distributed control systems. Future directions, such as the incorporation of machine learning for adaptive model refinement and the use of digital twins for predictive optimization, are outlined. The results confirm that APC and RTO are essential tools for achieving sustainable and energy-efficient refining operations.

Keywords: advanced process control, model predictive control, real-time optimization, energy efficiency, oil refining, crude distillation unit, fired heaters, digital twin.

Є. А. Коровяка, В. Л. Хоменко, А. О. Ігнатів

ЗАСТОСУВАННЯ СУЧАСНОГО КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСАМИ ТА ОПТИМІЗАЦІЇ В РЕАЛЬНОМУ ЧАСІ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ НАФТОПЕРЕРОБКИ

Енергоспоживання є однією з найбільших статей операційних витрат у нафтопереробці, і його скорочення має критичне значення як для економічної ефективності, так і для екологічної відповідності. Традиційні системи регулювання, однак, не здатні

підтримувати роботу процесів у дійсному оптимумі за умов змінної сировини та ринкових коливань. У статті досліджено застосування технологій сучасного керування процесами (APC) та оптимізації в реальному часі (RTO) для підвищення енергоефективності нафтопереробних установок. Розглянуто інтеграцію модельного прогнозуючого керування (MPC) з детермінованими моделями процесів, онлайн-аналізаторами та економічною оптимізацією. Представлено ієрархічну архітектуру, що включає рівні регулювання, багатовимірною прогнозуючого керування та стаціонарної оптимізації. Підкреслено роль узгодження даних у реальному часі, виявлення грубих помилок та оновлення моделей. Приклади з установок первинної перегонки нафти (CDU), регенераторів каталітичного крекінгу (FCC) та трубчастих печей демонструють економію енергії на рівні 3-8% і значне скорочення викидів парникових газів. Розглянуто проблеми впровадження, включаючи підтримку моделей, навчання персоналу та інтеграцію з існуючими розподіленими системами керування. Окреслено перспективні напрями, такі як використання машинного навчання для адаптивного уточнення моделей та застосування цифрових двійників для прогнозної оптимізації. Результати підтверджують, що APC та RTO є важливими інструментами для досягнення сталого та енергоефективного нафтопереробного виробництва.

Ключові слова: сучасне керування процесами, модельно-прогнозуюче керування, оптимізація в реальному часі, енергоефективність, нафтопереробка, установка первинної перегонки нафти, трубчасті печі, цифровий двійник.

Отримано редколегією 18.03.2026

Коров'яка Євгеній Анатолійович (Yevhenii Koroviaka), канд. техн. наук, доцент, зав. каф. Національного технічного університету «Дніпровська політехніка», <https://orcid.org/0000-0002-2675-6610>;

Хоменко Володимир Львович (Volodymyr Khomenko), канд. техн. наук, доцент, доцент Національного технічного університету «Дніпровська політехніка» <https://orcid.org/0000-0002-3607-5106>;

Ігнатів Андрій Олександрович (Andrii Ihnatov), канд. техн. наук, доцент, доцент Національного технічного університету «Дніпровська політехніка» <https://orcid.org/0000-0002-7653-125X>.

Ю. А. Селіхов, канд. техн. наук, доцент, К. В. Перемот, студентка,
Е. Р. Нагорний, аспірант, І. В. Пільник, аспірант, В. Г. Рись, аспірант

МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ ТЕПЛОВОГО НАСОСУ ДЛЯ КОМФОРТНОГО ЖИТТЄЗАБЕЗПЕЧЕННЯ БАГАТОПОВЕРХОВОГО БУДИНКУ

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків

Ключові слова: моделювання, інтеграція, гаряче водопостачання, опалення, теплі підлоги, енергетична ефективність, теплоенергетичні установки, електричні бойлери, універсальні котли, двоконтурні котли, централізоване опалення, геотермальна енергія, «грунт – вода», відновлювані джерела енергії, охолодження будинку, багатоповерхові будинки, сонячна енергія, ексергія, ефективність, водонагрівачі, теплоізоляція, техніко-економічне обґрунтування, термін окупності.

Постановка задачі. До складу системи централізованого теплопостачання (ЦТ) входять такі основні елементи: джерело тепла, теплові мережі та місцеві системи споживання – системи теплопостачання, кондиціонування (охолодження) та гарячого водопостачання. Для ЦТ застосовуються два типи теплоджерел: комбіновані установки (теплоелектроцентралі - ТЕЦ) та централізовані теплові пункти (ЦТП) [1]. Комбіноване виробництво теплової та електричної енергії на ТЕЦ забезпечує значне зменшення витрат питомого пального на виробництво енергії. У цьому випадку теплота теплоносія – водяної пари – спочатку застосовується для виробництва електроенергії шляхом розширення пари в турбінах, а потім залишкова теплота відпрацьованої пари використовується для нагрівання води в рекуператорах, що входять до складу теплоутилізаційного обладнання ТЕЦ. Отримана нагріта вода подається для теплопостачання та гарячого водопостачання. Отже, на ТЕЦ високо потенційне тепло застосовується з метою генерації електроенергії, тоді як низькопотенційне тепло застосовується для теплопостачання. У цьому енергетичний сенс комбінованого виробництва теплової та електричної енергії. Коли вони виробляються окремо, електроенергія виробляється на конденсаційних електростанціях (КЕС), тоді як тепло виробляється в котельнях [2].

Транспортування теплоносія від джерел тепла здійснюється теплопроводами. За подавальними теплопроводами гаряча вода з одного з контурів котла подається в радіатори до споживачів, де віддає своє тепло і після охолодження повертається до джерела тепла за зворотними теплопроводами. Отже, відбувається безперервна циркуляція теплоносія між джерелом тепла і кінцевими користувачами. Теплопродуктивність сучасних радіаторів становить 150÷200 Гкал/год. А другий контур котла подає гарячу воду для гарячого водопостачання кухні, ванни тощо [3].

Основні теплові мережі муніципальних систем теплопостачання – це складні технічні конструкції. Теплові мережі включають в себе теплопроводи; компенсатори, що поглинають температурні деформації; запірну, регулюючу та захисну апаратуру, встановлену в спеціалізованих приміщеннях або павільйонах; мережеві насосні станції; центральні теплові пункти (ЦТП). Труби теплопроводів укладають у підземних умовах у герметичних і напівнепроникних каналах, у колекторах і безканално. З метою скорочення теплових втрат у процесі руху енергоносія по трубах застосовується їхня теплоізоляція [4]. В якості прототипу ми взяли десяти поверховий сорока квартирний буди-

нок, який забезпечується гарячим водопостачанням та опаленням двоконтурним універсальним котлом KV – 0,5, працюючим на природному газу, який стоїть у підвалі десяти поверхового сорока квартирного будинку. Аналіз роботи цього котла, виконаний нами, виявив недоліки в його роботі: викиди шкідливих речовин в довкілля при згорянні природного газу; контури котла неспроможні працювати окремо один від одного; підігрів води влітку неможливий за умови відсутності опалення житла.

Мета статті. Моделювання і розрахунок геотермального теплового насосу для гарячого водопостачання, опалення та охолодження десяти поверхового сорока квартирного будинку в якості заміни котла KV – 0,5.

Одна з безсумнівних плюсів цього будинку – це його майже повна самостійність відносно комунальних служб.

Зробивши аналіз роботи різних варіантів застосування теплових насосів, був обраний варіант з централізованим теплопостачанням та децентралізованим гарячим водопостачанням [5], яке може застосовуватися в багатоквартирних будинках, представлений на рис. 1.

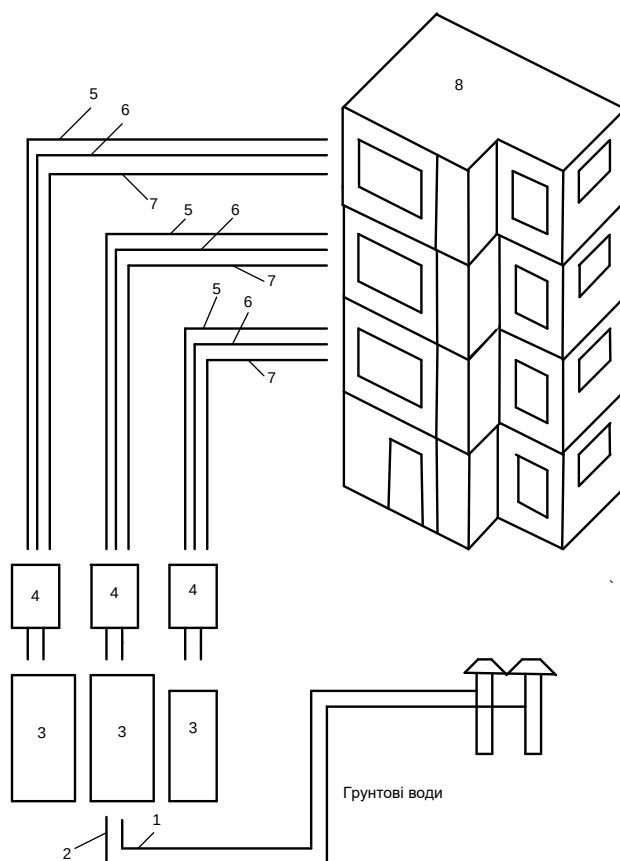


Рисунок 1 – Централізоване теплопостачання та децентралізоване гаряче водопостачання

1, 2 – Низько потенційна тепломережа; 3 - Центральний тепловий пункт на основі геотермальних теплових насосів «грунт – вода»; 4 – Квартирні теплові пункти; 5, 6 – Мережа гарячого водопостачання; 7 – Мережа холодного водопостачання; 8 – Багатоквартирний будинок

Центральний тепловий пункт на основі геотермальних теплових насосів відповідає найвищим вимогам енергоефективності та захисту навколишнього середовища. Приготування гарячої води виконується за допомогою квартирних теплових пунктів.

Впроваджуючи систему опалення, необхідно обрати найоптимальніший для кожного окремого варіанту, тому першим кроком є проведення розрахунків проєктованої опалювальної системи. Для цієї мети сьогодні існує багато методів і спеціалізованих програм, однак оптимальним методом є обчислення потрібної теплової потужності задля того, щоб максимально забезпечити об'єкт необхідною кількістю теплової енергії [6].

Узагальнений підрахунок цим методом містить багато математичних формул і показників. Найчастіше головним постачальником тепла в будинку є автономне водяне опалення. Даний фактор базується на тому, наскільки саме ця система дає змогу досягти максимально вигідних технічних характеристик і при цьому забезпечує високу ступінь комфортності та безпеку експлуатації для користувачів.

Перше, на що необхідно звернути увагу – це вибір теплогенеруючого пристрою. Так, для системи водяного опалювання може застосовуватися обігрівальний котел, що функціонує на різних видах палива, але він викидає в довкілля багато шкідливих речовин.

Вибір найбільш відповідного агрегату ґрунтується на індивідуальних особливостях об'єкту і технологічних вимогах. Розрахунок буде базуватися на стандартному значенні необхідної потужності опалення на кубометр для європейського регіону – 41 Вт на кубометр (даний багатоквартирний будинок збудований з утеплювачем та склопакетами згідно з сучасними будівельними вимогами, де всі стіни є зовнішніми) [7]. Зробимо спробу спрощеного підрахунку потрібної потужності теплогенеруючого пристрою та радіаторів, зважаючи на те, що на всіх поверхах будинку висота стель становить 2,5 метри.

Десять однокімнатних квартир загальною площею 340 м² (850 м³); десять двокімнатних квартир загальною площею 460 м² (1150 м³) і двадцять трьохкімнатних квартир загальною площею 1280 м² (3200 м³) – будинок загальною площею 2080 м² (5200 м³) [8].

Також маємо враховувати коридори та переходи з поверху на поверх, що додасть ще 500 кубометрів. Обсяг опалювальних приміщень становитиме 5700 м³. Тоді тепла потужність для опалення 5700 м³ становитиме, Вт:

$$N_K = 5700 \cdot 41 = 233700. \quad (1)$$

Цю цифру N_K , кВт, збільшуємо на 20 %, інакше теплогенеруючий пристрій увесь час працюватиме на повну потужність і може швидко вийти з ладу.

$$N_K = 233700 \cdot 1,2 = 280440 \approx 281. \quad (2)$$

Кількість теплоносія, що потрібна для роботи системи опалювання, визначаємо так: на 1 кВт доводиться 15 л теплоносія, а отже, в системі буде

$$V_{\text{л}} = N_K \cdot 15 = 300 \cdot 15 = 4500 \text{ л}. \quad (3)$$

Таким чином в системі опалювання працюватиме 4500 літрів теплоносія.

У всіх випадках генерація тепла з кожного окремого метра теплообмінної труби напряму залежить від кількох параметрів, як зазначалося раніше. Зокрема, це глибина

прокладання, наявність підземних вод, якість землі та інші. Перш за все, необхідно обчислити тепловий баланс будинку. Для цих обчислень варто використовувати формулу:

$$R = (k \cdot V \cdot t) / 860, \quad (4)$$

де R – споживана потужність приміщення (кВт/год); k – середній коефіцієнт втрат тепла будівлею: наприклад, так само 1 – відмінно утеплена будівля, а 4 – барак з дощок; V – сумарний обсяг усього опалювального приміщення, м³; t – максимальний перепад температури між вулицею і всередині приміщення; 860 – значення, необхідне для перекладу одержаних ккал в кВт.

У разі теплового насоса «грунт – вода» також необхідно розрахувати необхідну довжину контуру, який буде знаходитися в землі. Відомо, що 1 метр теплового ґрунтового контуру колектора дає близько 50 Вт [9]. Дізнавшись потрібну потужність насоса, ми можемо легко розрахувати, з якої кількості труб нам необхідно зробити контур. Давайте розрахуємо всі параметри для нашого багатоквартирного будинку. Площа, що опалюється – 2080 м²; висота стель – 2,5 м; будівля добре утеплена; взимку мінімальна температура на вулиці -25 °С; комфортна температура в приміщенні +22 °С. Загальна опалювальна площа приміщень становитиме 5700 м³. Потім обчислюємо значення, °С:

$$t = 22 - (-25) = 47. \quad (5)$$

Підставляємо ці дані в формулу (4), кВт/год:

$$R = (k \cdot V \cdot t) / 860 = (1 \cdot 5700 \cdot 47) / 860 = 311,512. \quad (6)$$

Отримуємо необхідну потужність теплового насоса 311,512 кВт/год. Цей показник збільшуємо на 20 %, оскільки інакше тепловий насос працюватиме весь час з повною потужністю і зможе досить швидко зламатися.

$$R = 311,512 \cdot 1,2 = 373,81. \quad (7)$$

Отже, купувати краще геотермальний тепловий насос на 374 кВт/год. Для його функціонування нам буде потрібно тепловий ґрунтовий колектор загальною довжиною, м

$$l = \frac{R}{50} = \frac{374000}{50} = 7480. \quad (8)$$

Кількість теплоносія, яка потрібна для ґрунтового теплового насоса. На 1 кВт доводиться 15 л теплоносія. Отже в системі буде, л:

$$V_n = N_k \cdot 15 = 374 \cdot 15 = 5610. \quad (9)$$

Ми обираємо геотермальний тепловий насос «грунт – вода». Такий тепловий насос можна компанувати в двох модифікаціях: 1. З горизонтальним тепловим колекто-

ром, якщо перед будинком є земельна ділянка, на якій можливо встановити колектор довжиною 7480 м [10]; 2. З вертикальним тепловим колектором. Увесь зовнішній контур системи зібраний за допомогою труб з полівінілхлоридного поліетилену. Схема горизонтального геотермального теплового насоса представлена на рисунку 2. Замість радіаторів опалення застосовуємо теплу підлогу.

Нами був обраний геотермальний тепловий насос «грунт – вода» WATERKOTTE фірми FRANK: з горизонтальним розташуванням теплообмінного ґрунтового колектора [11].

Вертикальні геотермальні теплові насоси використовують свердловини глибиною до 150 метрів. Всередині свердловин розміщуються труби з теплоносієм, які забирають тепло зі стабільних температурних шарів ґрунту.

Розрахуємо схему [11, 12] парокомпресійного теплового насосу (див. рис. 2) з теплопродуктивністю $Q_B=374$ кВт/год.

Як джерело тепла низького потенціалу використовується ґрунт з температурою на вході у випарник $t_{H1}=7$ °С та на виході з нього $t_{H2}=3$ °С. Температура води на вході в охолоджувач $t_{П.О}=35$ °С, а на виході з конденсатора $t_{В1}=75$ °С. Робочий агент в тепловому насосі є – фреон R407C $\Delta t_{П.О}=10$ °С. Внутрішній адіабатний ККД компресора $\eta_i=0,8$. Електромеханічний ККД компресора $\eta_{ЭМ}=0,9$. $\Delta t_{И}=1,5$ °С. $\Delta t_K=5$ °С. Визначити питомі показники всіх частин теплового насоса, ексергетичний ККД теплового насоса, коефіцієнт трансформації теплоти.

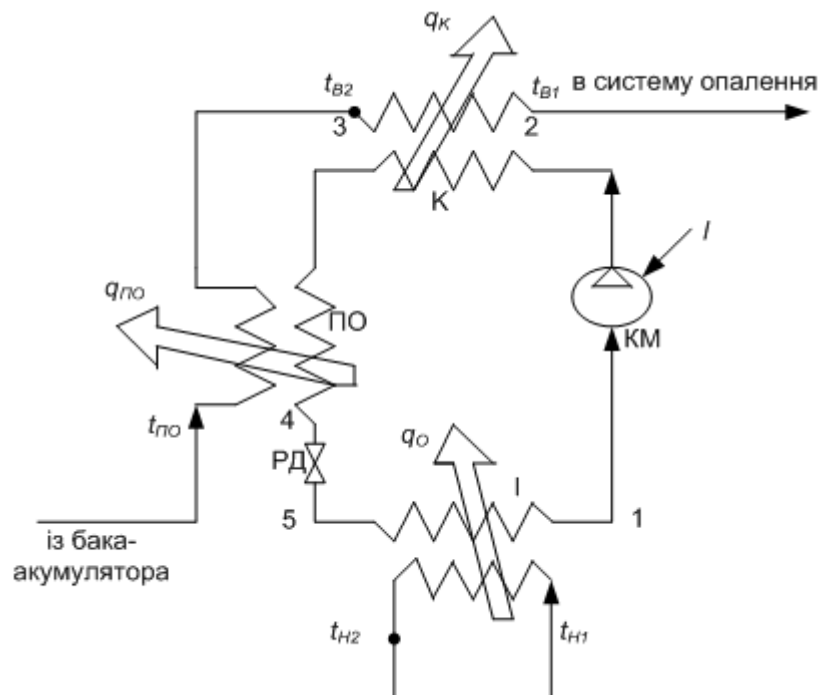


Рисунок 2 – Принципова схема геотермального теплового насоса

Робочим агентом в тепловому насосі є – фреон R407C. Діаграма стану фреону R407C представлена на рис. 3.

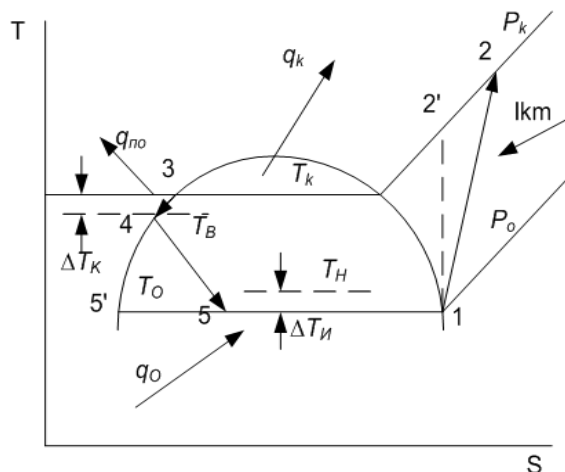


Рисунок 3 – Діаграма стану фреону R407C

Розрахунок схеми парокомпресійного теплового насосу (див. рис. 3) з теплопродуктивністю $Q_B=374$ кВт/год представлений в таблиці 1.

Таблиця 1 – Розрахунок схеми парокомпресійного теплового насосу

N п/п	Параметри, які визначаються	Формули, за якими визначаються параметри	Значення параметрів
1	Температуру випаровування, °C, (див. рис. 3)	$t_o = t_{H2} - \Delta t_{и}$	3,5
2	Температуру конденсації, °C, (див. рис. 3)	$t_k = t_{B1} + \Delta t_k$	80
3	Використовуючи T,S – діаграму стану для фреону – R407C (див. рис. 3), визначаємо параметри робочого агента в наступних точках схеми.	точка 1: $t_1 = t_o$, °C; p_1 , МПа; i_1 , кДж/кг; v_1 , м ³ /кг; точка 2: p_2 , МПа; i_2^1 , кДж/кг; t_2^1 , °C; точка 3: t_3 , °C, p_3 , МПа; i_3 , кДж/кг; точка 4: t_4 , °C, p_4 , МПа; i_4 , кДж/кг; точка 5: t_5 , °C, i_5 , кДж/кг.	$t_1=1,5$; $p_1=0,08$; $i_1=665$; $v_1=0,275$; $p_2=0,78$; $i_2^1=724$; $t_2^1=110$; $t_3=80$; $p_3=0,78$; $i_3=506$; $t_4=45$; $p_4=0,78$; $i_4=468$; $t_5=+1,5$; $i_5=468$.

4	Ентальпію робочого агента, кДж/кг, на виході з компресора (точка 2, див. рис. 3) при внутрішньому адіабатному ККД компресора $\eta_i = 0,8$	$i_2 = i_1 + \frac{l_a}{\eta_i}$, кДж/кг.	739
5	Питому внутрішню роботу компресора, кДж/кг	$l_a = i_2 - i_1$	74
6	Питоме теплове навантаження випарника, кДж/кг	$q_o = i_1 - i_5$	197
7	Питоме теплове навантаження конденсатора, кДж/кг	$q_k = i_2 - i_3$	233
8	Питоме теплове навантаження охолоджувача, кДж/кг	$q_{п.о} = i_3 - i_4$	38
9	Перевіримо енергетичний баланс, кДж/кг	$q = l_a + q_o = q_k + q_{п.о}$	271=271
10	Масову витрату робочого агента, кг/с	$G = \frac{Q_B}{(q_k + q_{п.о})}$	0,383
11	Об'ємну продуктивність компресора, м ³ /с	$V_1 = G \cdot v_1$	0,1053
12	Розрахункове теплове навантаження випарника, кВт	$Q_o = G \cdot q_o$	75,45
13	Розрахункове теплове навантаження охолоджувача, кВт	$Q_{п.о} = G \cdot q_{п.о}$	14,55
14	Розрахункове теплове навантаження конденсатора, кВт	$Q_k = q_k \cdot G$	89,24
15	Питому роботу компресора, кДж/кг, знаючи електро механічний ККД компресора $\eta_{EM} = 0,9$	$l_{KM} = \frac{l_a}{\eta_{EM}}$	82,22
16	Питому витрату електроенергії на одиницю виробленого тепла	$E_{т.н} = \frac{l_{KM}}{(q_k + q_{п.о})}$	0,304
17	Електричну потужність компресора, кВт	$N_{KM} = l_{KM} \cdot G$	31,49
18	Коефіцієнт трансформації теплоти	$K_T = \frac{(q_k + q_{п.о})}{l_{KM}}$	3,3
19	Середню температуру низькотемпературного тепловіддатчика, К	$T_{н.ср} = (t_{H1} + t_{H2}) + 273$	283
20	Середню температуру отриманого тепла, К	$T_B^{CP} = (t_{B1} + t_{п.о}) + 273$	383

21	Коефіцієнт працездатності тепла з потенціалом T_B^{CP}	$\tau_1 = 1 - \frac{T_{O.C}}{T_B^{CP}}$	0,235
22	Коефіцієнт працездатності холоду з потенціалом $T_{H.CP}$	$\tau_0 = 1 - \frac{T_{O.C}}{T_{H.CP}}$	-0,035
23	Ексергію електрики, кВт, де τ_E – коефіцієнт працездатності електричної і механічної енергії дорівнює одиниці.	$E_E = N_{KM} \cdot \tau_E$	31,49
24	Ексергію конденсатора, кВт	$E_K = Q_K \cdot \tau_1$	20,97
25	Ексергію охолоджувача, кВт	$E_{PO} = Q_{PO} \cdot \tau_0$	3,42
26	Ексергію холоду, кВт	$E_O = Q_O \cdot \tau_0$	2,64
27	Ексергетичний ККД ґрунтового геотермального теплового насоса	$\eta_{ex} = \frac{E_K + E_{PO}}{E_E}$	0,775

Висновки

Був зроблений проєкт моделювання і розрахунків геотермального теплового насоса для гарячого водопостачання, опалення та охолодження десяти поверхового сорока квартирному будинку. За результатами розрахунку була розроблена нова принципова схема роботи теплового насоса, який забезпечує централізоване тепlopостачання та охолодження десяти поверхового сорока квартирному будинку. А децентралізовані квартирні станції для розподілу та гігієнічної підготовки гарячої води зроблені на основі бойлерів. Зроблений аналіз літературних джерел дав можливість обрати нове обладнання з найвищим коефіцієнтом корисної дії. Розрахунки підтвердили коректність вибору типу обладнання та матеріалів для заміни. Отримани ексергетичний коефіцієнт корисної дії нової теплоенергетичної установки – 78 % для даного проєкту, а також термін її енергетичної окупності – 3,5 роки, а також застосування геотермального теплового насоса «ґрунт – вода» у теплоенергетичній установці дозволяє: – зменшити собівартість теплової енергії за рахунок зниження матеріаломісткості та витрат на обладнання, заощаджувати органічне паливо; виробляти теплову енергію; зменшити теплове навантаження та забруднення навколишнього середовища.

Розрахунок економії коштів, після відмови від природного газу як енергоносія для теплогенеруючого пристрою, дав економію – 4029166,32 грн.

Література

1. Тарадай О. М. Теплозабезпечення : монографія. Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2025. 322 с. URL: <http://eprints.kname.edu.ua/68139/1/2025%208МН%20репоз%20Тарадай%20О.%20М.pdf>.
2. Державні будівельні норми України. Опалення, вентиляція та кондиціонування: ДБН В.2.5-67:2013. Київ : Мінрегіон України, 2013. URL:

<https://document.vobu.ua/wp-content/uploads/DBN/100.1.-DBN-V.2.5-672013.-Opalennya-ventilyatsiya-ta-konditsi.pdf>.

3. Малявіна О. М., Міланко В. А. Опалення : конспект лекцій. Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2023. 96 с. URL: <http://eprints.kname.edu.ua/63429/1/Малявіна%2C%20Міланко%2C%20109Л%2C%202021%2C%20pdf.pdf>.

4. Перехід України на відновлювану енергетику до 2050 року / О. Дячук; за заг. ред. Ю. Огаренко, О. Алієвої. Київ : АРТ КНИГА, 2017. 88 с. URL: https://energytransition.in.ua/wp-content/uploads/2018/11/Perehid-Ukrainy-na-vidnovlyuvanu-energetuky-do-2050_zvit.pdf.

5. Територіальний розвиток та регіональна політика в Україні / наук. ред. В. С. Кравців. Львів, 2015. 204 с. (Серія «Проблеми регіонального розвитку»). URL: <http://ird.gov.ua/irdp/p20150101a.pdf>.

6. Альтернативні джерела енергії у підвищенні енергоефективності та енергонезалежності сільських територій : колективна монографія / за ред. І. О. Яснолоб, Т. О. Чайки, О. О. Горба. Полтава : Астроя, 2019. 276 с. URL: <http://dspace.puet.edu.ua/bitstream/123456789/7404/1/Моно%20АДЕ%20СТ.pdf>.

7. Використання палива в Україні та по регіонах у 2017 році. *Державна служба статистики України*. URL: <http://www.ukrstat.gov.ua/>.

8. Кудря С. О. Нетрадиційні та відновлювані джерела енергії: підручник. Київ : НТУУ «КПІ», 2012. 492 с. URL: http://pdf.lib.vntu.edu.ua/books/2020/Kudrya_2012_492.pdf.

9. Про внесення змін до Закону України «Про теплопостачання» щодо стимулювання виробництва теплової енергії з альтернативних джерел енергії: Закон України від 21.03.2017 № 1959-VIII. URL: <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/1959-19>.

10. Ексергетичні розрахунки технічних систем: довід. посіб. / В. М. Бродяньський та ін.; під ред. А. А. Долинського, В. М. Бродяньського. Київ : Наук. думка, 1991. 360 с. URL: <https://studfile.net/preview/20202839/>.

11. Паливно-енергетичні ресурси України: стат. зб. Київ : Держкомстат України, 2001. 273 с. URL: https://books.google.com.ua/books/about/Паливно_енергетичні_p.html?id=iV-0AAAAIAAJ&redir_esc=y.

12. Економіка підприємства : навч. посіб. / за заг. ред. Л. С. Шевченко. Харків : Національний університет «Юридична академія України ім. Ярослава Мудрого», 2011. 208 с. URL: https://library.nlu.edu.ua/POLN_TEXT/POSIBNIKI_2011/0019.pdf.

Bibliography (transliterated)

1. Taradai O. M. Teplozabezpechennia : monohrafiia. Kharkiv : KhNUMH im. O. M. Beketova, 2025. 322 p. URL: <http://eprints.kname.edu.ua/68139/1/2025%20MN%20repoz%20Taradai%20O.%20M.pdf>.

2. Derzhavni budivelni normy Ukrainy. Opalennia, ventilyatsiia ta kondytsionuvannia: DBN V.2.5-67:2013. Kyiv : Minrehion Ukrainy, 2013. URL: <https://document.vobu.ua/wp-content/uploads/DBN/100.1.-DBN-V.2.5-672013.-Opalennya-ventilyatsiya-ta-konditsi.pdf>.

3. Maliavina O. M., Milanko V. A. Opalennia: konspekt lektsii. Kharkiv : KhNUMH im. O. M. Beketova, 2023. 96 p. URL: <http://eprints.kname.edu.ua/63429/1/Maliavina%2C%20Milanko%2C%20109L%2C%202021%2C%20pdf.pdf>.
4. Perehid Ukrainy na vidnovliuvanu enerhetyku do 2050 roku / O. Diachuk; za zah. red. Yu. Oharenko, O. Aliievoi. Kyiv : ART KNYHA, 2017. 88 p. URL: https://energytransition.in.ua/wp-content/uploads/2018/11/Perehid-Ukrainy-na-vidnovlyuvanu-energetuky-do-2050_zvit.pdf
5. Terytorialnyi rozvytok ta rehionalna polityka v Ukraini / nauk. red. V. S. Kravtsiv. Lviv, 2015. 204 p. (Seriia «Problemy rehionalnoho rozvytku»). URL: <http://ird.gov.ua/irdp/p20150101a.pdf>
6. Alternatyvni dzherela enerhii u pidvyshchenni enerhoefektyvnosti ta enerhonezalezhnosti silskykh terytorii : kolektyvna monohrafiia / za red. I. O. Yasnolob, T. O. Chaiky, O. O. Horba. Poltava : Astraia, 2019. 276 p. URL: <http://dspace.puet.edu.ua/bitstream/123456789/7404/1/Моно%20АДЕ%20СТ.pdf>
7. Vykorystannia palyva v Ukraini ta po rehionakh u 2017 rotsi. Derzhavna sluzhba statystyky Ukrainy. URL: <http://www.ukrstat.gov.ua/>.
8. Kudria S. O. Netradytsiini ta vidnovliuvani dzherela enerhii : pidruchnyk. Kyiv : NTUU «KPI», 2012. 492 p. URL: http://pdf.lib.vntu.edu.ua/books/2020/Kudrya_2012_492.pdf.
9. Pro vnesennia zmin do Zakonu Ukrainy «Pro teplopостachannia» shchodo stymuliuвання vyrobnytstva teplovoi enerhii z alternatyvnykh dzherel enerhii : Zakon Ukrainy vid 21.03.2017 No 1959-VIII. URL: <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/1959-19>.
10. Ekserhetychni rozrakhunky tekhnichnykh system : dovid. posib. / V. M. Brodianskyi ta in.; pid red. A. A. Dolynskoho, V. M. Brodianskoho. Kyiv : Nauk. dumka, 1991. 360 p. URL: <https://studfile.net/preview/20202839/>
11. Palyvno-enerhetychni resursy Ukrainy : stat. zb. Kyiv: Derzhkomstat Ukrainy, 2001. 273 p. URL: https://books.google.com.ua/books/about/Palyvno_enerhetychni_r.html?id=iV-0AAAAIAAJ&redir_esc=y
12. Ekonomika pidpriemstva : navch. posib. / za zah. red. L. S. Shevchenko. Kharkiv : Natsionalnyi universytet «Iurydychna akademiia Ukrainy im. Yaroslava Mudroho», 2011. 208 p. URL: https://library.nlu.edu.ua/POLN_TEXT/POSIBNIKI_2011/0019.pdf.

УДК 662.997

Ю. А. Селіхов, канд. техн. наук, доцент, К. В. Перемот, студентка,
Е. Р. Нагорний, аспірант, І. В. Пільник, аспірант, В. Г. Рись, аспірант

МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ ТЕПЛОВОГО НАСОСУ ДЛЯ КОМФОРТНОГО ЖИТТЄЗАБЕЗПЕЧЕННЯ БАГАТОПОВЕРХОВОГО БУДИНКУ

До складу системи централізованого теплопостачання (ЦТ) багатоповерхових будівель входять такі основні елементи: джерело тепла, теплові мережі та місцеві сис-

теми споживання - системи теплопостачання, кондиціонування (охолодження) та гарячого водопостачання. Теплогенеруючий пристрій (котельня) виробляє тепло та розподіляє його за квартирами на поверхах. Але при згоранні природного газу в теплогенеруючому пристрої (котельні) в довкілля викидаються такі шкідливі речовини як: діоксид азоту, діоксид вуглецю. Був зроблений проєкт моделювання і розрахунок геотермального теплового насосу для гарячого водопостачання, опалення та охолодження десяти поверхового сорока квартирному будинку в якості заміни теплогенеруючого пристрою. За результатами розрахунку була розроблена нова принципова схема роботи теплового насосу який забезпечує централізоване теплопостачання та охолодження десяти поверхового сорока квартирному будинку. А децентралізовані квартирні станції для розподілу та гігієнічної підготовки гарячої води зроблені на основі бойлерів. Зроблений аналіз літературних джерел дав можливість обрати нове обладнання з найвищим коефіцієнтом корисної дії. Розрахунки підтвердили коректність вибору типу обладнання та матеріалів для заміни. Отриманий ексергетичний коефіцієнт корисної дії нової теплоенергетичної установки – 78 % для даного проєкту, а також термін її енергетичної окупності – 3,5 роки, а також застосування геотермального теплового насосу «грунт – вода» у теплоенергетичній установці дозволяє: – зменшити собівартість теплової енергії за рахунок зниження матеріаломісткості та витрат на обладнання, заощаджувати органічне паливо; виробляти теплову енергію; зменшити теплове навантаження та забруднення навколишнього середовища. Розрахунок економії коштів після відмови від природного газу як енергоносія для теплогенеруючого пристрою, дав економію – 4029166,32 грн.

Ключові слова: моделювання, інтеграція, гаряче водопостачання, опалення, теплі підлоги, енергетична ефективність, теплоенергетичні установки, електричні бойлери, універсальні котли, двоконтурні котли, централізоване опалення, геотермальна енергія, «грунт – вода», відновлювані джерела енергії, охолодження будинку, багатопверхові будинки, сонячна енергія, ексергія, ефективність, водонагрівачі, теплоізоляція, техніко-економічне обґрунтування, термін окупності.

Yu. A. Selikhov, K. V. Peremot, E. R. Nagorniy, I. V. Pilnyk, V. G. Rys

SIMULATION OF HEAT PUMP OPERATION TO ENSURE COMFORTABLE LIFE IN A MULTI-STORY HOUSE

The central heating (CH) system of multi-storey buildings includes the following main elements: a heat source, heating networks and local consumption systems - heating, air conditioning (cooling) and hot water supply systems. A heat generating device (boiler room) produces heat and distributes it to apartments on the floors. But when natural gas is burned in a heat-generating device (boiler room), harmful substances such as nitrogen dioxide and carbon dioxide are released into the environment. A project was developed to model and calculate a geothermal heat pump for hot water supply, heating and cooling of a ten-story forty-apartment building. Based on the results of the calculation, a new schematic diagram of the heat pump was developed, which provides centralized heating and cooling of a ten-story forty-apartment building. And decentralized apartment stations for the distribution and hygienic preparation of

hot water are made on the basis of boilers. The analysis of literary sources made it possible to choose new equipment with the highest efficiency. The calculations confirmed the correctness of the choice of the type of equipment and materials for replacement. The obtained exergy efficiency of the new thermal power plant is 78 % for this project, as well as its energy pay-back period is 3.5 years, and the use of a geothermal heat pump "ground – water" in the thermal power plant allows: – to reduce the cost of thermal energy by reducing material consumption and equipment costs, save organic fuel; produce thermal energy; reduce thermal load and environmental pollution. Calculation of cost savings after abandoning natural gas as an energy carrier for a heat-generating device gave savings of UAH 4,029,166.32. Also, 1341 tons/year of harmful substances are not emitted into the environment.

Keywords: modeling, integration, hot water supply, heating, underfloor heating, energy efficiency, thermal power plants, electric boilers, universal boilers, double-circuit boilers, central heating, geothermal energy, "soil - water", renewable energy sources, house cooling, multi-storey buildings, solar energy, exergy, efficiency, water heaters, thermal insulation, feasibility study, payback period.

Отримано редколегією 03.02.2026

Селіхов Юрій Анатолійович (Yurii Selikhov), канд. техн. наук, доцент, професор Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», <https://orcid.org/0000-0002-8679-2752>;

Перемот Карина Віталіївна (Karina Peremot), студентка Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», <https://orcid.org/0009-0000-2026-9224>.

Нагорний Ельдар Рамісович (Eldar Nagorniy), аспірант Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», <https://orcid.org/0009-0001-9652-5252>;

Пільник Іван Вадимович (Ivan Pilnyk), аспірант НТУ «ХПІ», <https://orcid.org/0009-0003-0583-0353>;

Рись Віталій Григорович (Vitalii Rys), аспірант Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», <https://orcid.org/0009-0007-7638-0504>.

Б. Г. Грудка, канд. техн. наук, доцент

ЗРІДЖУВАЧ ВОДНЮ З НЕОНОВИМ КРІОГЕННИМ РЕФРИЖЕРАТОРОМ*Одеський національний технологічний університет, Одеса*

Ключові слова: цикл високого тиску, діафрагмовий компресор, рідкий водень, рідкий неон, конверсія водню.

Вступ

Вже у поточному столітті очікується заміщення традиційних палив альтернативними енергоносіями через виснаження природних органічних ресурсів. Доступним та екологічним «паливом майбутнього» може стати водень – найпоширеніший елемент у Всесвіті. Однак поряд з незаперечними перевагами водень характеризується рядом несприятливих фізичних властивостей. Так, найлегший елемент періодичної системи, водень, відрізняється малою густиною, тому його зберігання та транспортування у газоподібній формі виявляється не ефективним. Незважаючи на дуже низьку температуру зрідження, одним із перспективних способів акумулювання водню є його зберігання у стані кріогенної рідини [1, 4].

У другій половині XX століття розроблені рідинні водневі системи для реалізації космічних програм, ефективних технологій хімічної промисловості, металургії та експериментальної техніки. Нині світове споживання рідкого водню перевищило 10^5 т/рік. Поруч із великотоннажними зріджувачами водню, виявляються затребуваними установки продуктивністю 15...20 $\text{дм}^3/\text{год}$ [2, 3]. Вони використовуються у вакуумній техніці, а також при випробуваннях заправної арматури та низькотемпературної ізоляції.

У маловитратних зріджувачах, як правило, застосовується дросельний цикл високого тиску ($P \approx 15$ МПа) з охолодженням робочого тіла нижче за температуру інверсії в азотних ваннах. У досконаліших установках реалізується розширення частини прямого потоку водню в детандері [2]. Перспективним вважатимуться водневі зріджувачі, отримані поєднанням водневого і гелієвого контурів [3–6]. При використанні комбінації двох робочих тіл виключається частина обладнання, що працює на газоподібному водні, та знижується тиск потоку водню до $P = 5,5$ МПа.

Найближчим до водню газом за температурою фазового переходу є неон. Цей холодоагент затребуваний у лабораторних дослідженнях, а також у технологіях одержання легких інертних газів [5–10]. У неону і водню близькі температури кипіння, проте густина і прихована теплота пароутворення (на одиницю об'єму) у неону значно вища (табл. 1). Ці особливості неону дозволяють використовувати його в експериментальній техніці для імітації температурних умов, характерних для кріогенних водневих систем [11–21].

Таблиця 1 – Фізичні властивості рідкого водню, неону та азоту при $P_{\text{н.у}} = 0,1013$ МПа

Параметр	Водень	Неон	Азот
Температура кипіння, К	20,4	27,1	77,4
Густина, $\text{кг}/\text{м}^3$	70,9	1207	806,1
Теплота пароутворення, $\text{кДж}/\text{кг}$ ($\text{кДж}/\text{дм}^3$)	448,7 (31,8)	85,8 (103,6)	199,2 (160,6)

Мета роботи – створення багатфункціонального комплексу з можливістю отримання рідких неону (Ne) та водню (H₂). Заміною гелієвого рефрижератора неоновим забезпечується відведення теплоти від потоку водню з меншими термодинамічними втратами при стабільній температурі холодоагенту киплячого (неону). У якості обладнання для забезпечення роботи термодинамічних циклів обрано досить апробовані мембранні компресори (табл. 2).

Таблиця 2 – Технічні характеристики мембранних компресорів

Тип	Продуктивність V_K , м ³ /год	Число ступенів	Тиск МПа, (абс)		Потужність N_K , кВт
			P_1 (всмоктування)	P_2 (нагнітання)	
4,0 МК-20/200	20	2	0,12	22,0	11,4
1,6 МК-20/12,5	22	1	0,12	1,35	4,3

Визначення основних характеристик неонових рефрижераторів

Розглянемо для порівняння показники неонових циклу.

Рефрижераторний режим. Схема циклу представлена на рис. 1.

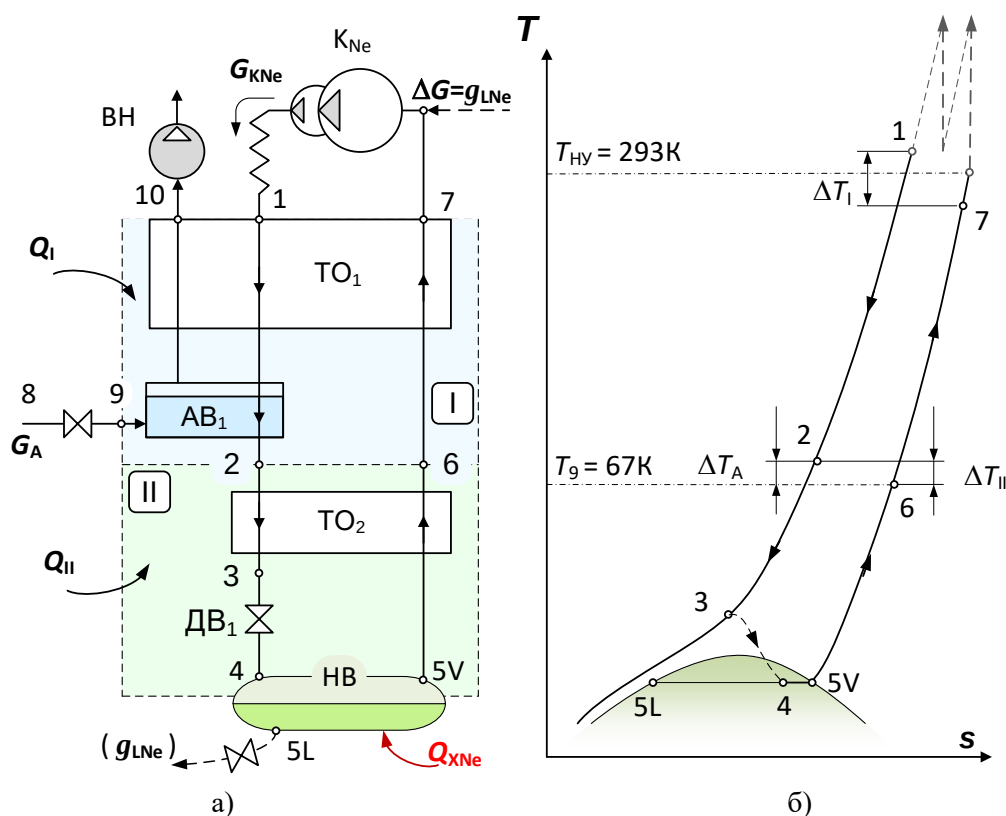


Рисунок 1 – Схема (а) та зображення в T,s -діаграмі (б) дросельного циклу із зовнішнім охолодженням: I – ступінь попереднього охолодження; II – дросельний ступінь; K_{Ne} – компресор; ВН – вакуум-насос; TO_1 та TO_2 – теплообмінники; $ДВ_1$ – дросельний вентиль; НВ – неонові ванна; АВ₁ – азотна ванна [$T_9 = 67$ K; $(T_2 - T_9) = 5$ K]; G_{KNe} – витрата газу в компресорі; G_A – витрата зовнішнього холодоагенту (LN₂); Q_I та Q_{II} – теплоприпливи; Q_{XNe} – корисне навантаження (холодопродуктивність циклу); g_{LNe} – рідкий неон

З теплового балансу контуру II (див. рис. 1) випливає:

$$G_2 \cdot h_2 + Q_{II} + Q_{XNe} = G_6 \cdot h_6, \quad (1)$$

де Q_{XNe} – холодопродуктивність, кВт; Q_{II} – теплоприпливи з довкілля, кВт; $G_2 = G_6 = G_{KNe}$ – масова витрата робочого тіла у циклі (продуктивність компресора K_{Ne} , див. рис. 1), кг/с; h_2 і h_6 – ентальпії прямого та зворотного потоків на межі контуру II, кДж/кг.

Питома холодопродуктивність рефрижераторного циклу

$$q_{XNe} = h_6 - h_2 - q_{II}, \quad (2)$$

де $q_{II} = 0,4$ кДж/кг – теплоприпливи із довкілля в контур II.

З урахуванням значень, наведених у табл. 3,

$$q_{XNe} = 128,2 - 95,9 - 0,4 = 31,9 \text{ кДж/кг.}$$

Таблиця 3 – До розрахунку неоновому циклу високого тиску із зовнішнім охолодженням

№ точок	Температура, К	Тиск, МПа (абс)	Ентальпія, кДж/кг
Параметри неону (рис. 1)			
1	300	18,0	375,1
2	72	18,0	95,9
3	56,4 (51,2*)	18,0	64,8 (54,2*)
4	27,7	0,12	64,8 (54,2*)
5L	27,7	0,12	1,1
5V	27,7	0,12	86,2
6	67	0,12	128,2
7	280	0,12	348,1
Параметри азоту (до рис. 1)			
8	83,6	0,20	-109,0
9	67	0,02	-109,0
10	280	0,02	+290,6
Параметри водню (до рис. 3)			
11	300	1,0	3962,1
12	72	1,0	975,0
18	67	0,18	944,6
19	280	0,18	3673,0

* – для рефрижераторного режиму.

З теплового балансу верхнього ступеня контуру I визначається відносна витрата рідкого азоту:

$$g_A = \frac{G_A}{G_{KNe}} = \frac{h_1 - h_7 + h_6 - h_2 + q_I}{h_{10} - h_8}, \quad (3)$$

де $q_I = q_{II} = 0,4$ кДж/кг – питомі теплоприпливи з навколишнього середовища.

Для прийнятих умов у режимі рефрижератора (див. табл. 3)

$$g_A = \frac{G_A}{G_{KNe}} = \frac{375,1 - 348,1 + 128,2 - 95,9 + 0,4}{290,6 - (-109)} = 0,149 \frac{\text{кг LN}_2}{\text{кг Ne}}.$$

На основі отриманих результатів розрахуємо характеристики циклу в залежності від витрати робочого тіла G_{KNe} . У якості блока компримування прийняті два паралельно включених компресора 4,0МК-20/200 (див. табл. 2). З урахуванням нормальної густини неону $\rho_{Hy} = 0,838$ кг/м³ масова витрата робочого тіла, що циркулює

$$G_{KNe} = 2 \cdot V_{K0} \cdot \rho_{Hy} = 2 \cdot 20 \cdot 0,838 = 33,5 \text{ кг/год} = 0,00931 \text{ кг/с}.$$

Потужність неоновому рефрижераторного блоку на основі двох компресорів МК-20 і $T_5 = 27,7$ К складе

$$Q_{XNe} = q_{XNe} \cdot G_{KNe} = 31,9 \cdot 0,00931 = 0,297 \text{ кВт} = 297 \text{ Вт}.$$

Витрата азоту в неоновому контурі згідно з формулою (3)

$$G_A = q_A \cdot G_{KNe} = 0,149 \cdot 0,00931 = 0,00139 \text{ кг/с} = 5,0 \text{ кг/год}.$$

Зрідження неону. Коефіцієнт зрідження неоновому циклу за відсутності корисного навантаження ($Q_{XNe} = 0$)

$$x_{Ne} = \frac{h_6 - h_2 - q_{II}}{h_6 - h_{5L}} = \frac{31,9}{128,2 - 1,1} = 0,251, \quad (4)$$

де $q_{II} = 0,4$ кДж/кг – питомі теплоприпливи до дросельного ступеня.

Продуктивність неоновому циклу в режимі зрідження

$$g_{LNe} = G_{KNe} \cdot x_{Ne} = 33,5 \cdot 0,251 = 8,41 \text{ кг/год};$$

$$v_{LNe} = g_{LNe} / \rho_{LNe} = 8,41 / 1,20 = 7,0 \text{ дм}^3/\text{год}.$$

Питома витрата рідкого азоту в режимі зрідження

$$*g_A = \frac{*G_A}{G_{KNe}} = \frac{h_1 - h_2 - (1 - x) \cdot (h_7 - h_6) + q_I}{h_{10} - h_8}. \quad (3-a)$$

Для прийнятих умов (див. табл. 3)

$$*g_A = \frac{*G_A}{G_{KNe}} = \frac{375,1 - 95,9 - (1 - 0,251) \cdot (348,1 - 128,2) + 0,4}{290,6 - (-109)} = 0,29 \frac{\text{кг LN}_2}{\text{кг Ne}}.$$

Витрата зовнішнього холодоагенту в режимі одержання рідкого неону

$$G_A^* = g_A^* \cdot G_{\text{KNe}} = 0,29 \cdot 0,00931 = 9,7 \text{ кг/год.}$$

Продуктивність водневого зріджувача

При комбінації неоновового та водневого циклів допускається зменшення ступеня стиснення у водневому контурі до мінімуму. Необхідно враховувати, що при тисках робочого тіла, характерних для одноступеневих компресорів (див. табл. 2), різниця ентальпій потоків ($h_{18}-h_{12}$) на теплому кінці теплообмінника TO_2 набуває від'ємного значення. Як впливає з табл. 4, за таких умов вкладу водневого контуру в холодопродуктивність комплексу не буде, і кріогенне забезпечення здійснюватиметься неоновим рефрижератором.

Таблиця 4 – Потенціал холодопродуктивності $\Delta h = (h_{18}-h_{12})$ залежно від тиску стиснення водню ($T_{12} = 72 \text{ K}$; $T_{18} = 67 \text{ K}$; $P_{11} = 0,18 \text{ МПа}$)

Тиск прямого потоку P_{12} , МПа	1	3	6	10	15
Ентальпія прямого потоку h_{12} , кДж/кг	975,0	921,4	855,0	803,5	786,7
Ентальпія зворотного потоку h_{18} , кДж/кг	944,6				
$\Delta h = (h_{18} - h_{12})$	-30,4	23,2	89,6	141,1	157,9

Тиск прямого потоку водню впливає на температуру конденсації водню в неоновій ванні [процес (14V–14L), рис. 2]. Наприклад, при $P = 1 \text{ МПа}$ перепад температур між рівноважними воднем і неоном у ванні НВ становить $\delta_1 = T_{14} - T_{5\text{Ne}} = 3,7 \text{ K}$. За достатньої поверхні теплообміну після конденсації відбуватиметься процес переохолодження водню [(14L–15), рис. 2].

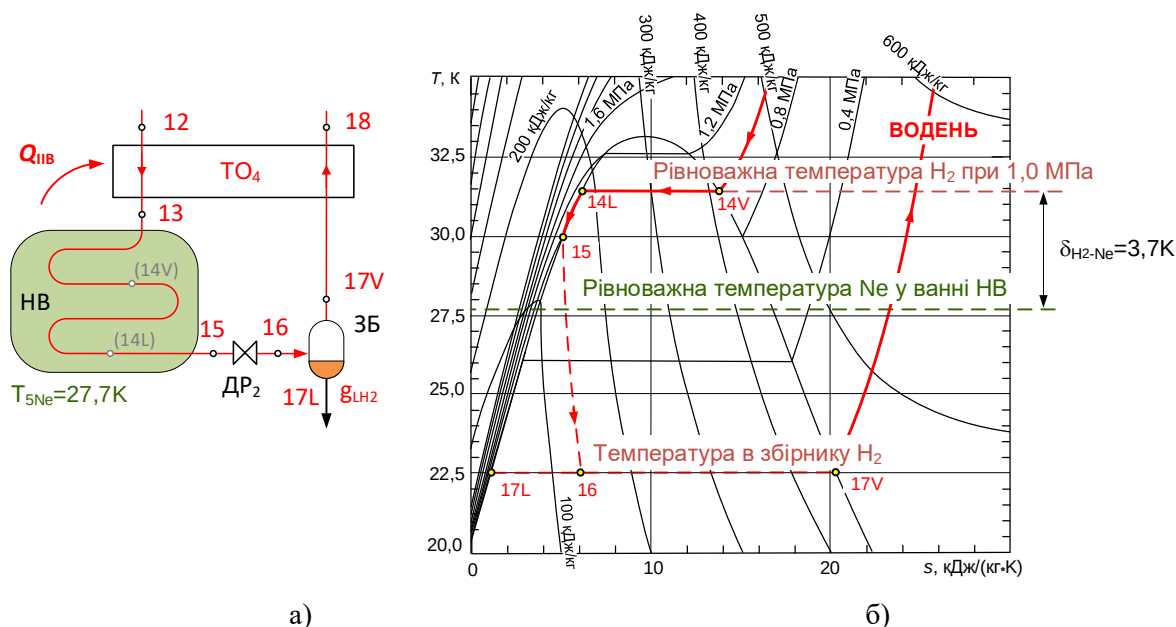


Рисунок 2 – Схема дросельного ступеня водневого циклу (а); T, s -діаграма процесу охолодження та конденсації водню в змійовику неоновій ванні НВ (б):

TO_4 – теплообмінник; ЗБ – збірник-сепаратор водню; DP_2 – дросель водневого циклу; g_{LH_2} – продуктивність зріджувача по рідкому водню

На основі матеріального балансу збірника-сепаратора ЗБ частка зріджуваного водню становить (див. рис. 2, а)

$$x_{H_2} = \frac{g_{H_2}}{G_{KH_2}} = \frac{(h_{17V} - h_{16})}{(h_{17V} - h_{17L})}, \quad (5)$$

де G_{KH_2} – витрата циркулюючого потоку; g_{LH_2} – продуктивність зріджувача.

Частка рідкого водню, що відбирається зі збірника-сепаратора ЗБ, відповідає умовам, наведеним у табл. 5.

Таблиця 5 – Параметри водню в змішувачу неонові ванни НВ та збірнику-сепаратору ЗБ (див. рис. 2, 3)

Потік водню		h , кДж/кг	T , К	P , МПа
Рівноважний водень у змішувачу неонові ванни НВ (точки 14V – 14L)	пара	418,5	31,4	1,0
	рідина	176,4		
Переохолоджена рідина перед дроселем ДР ₂ (точка 15)		137,2	30,0	
Парорідинна суміш після дроселя ДР ₂ (точка 16)		137,2	22,5	0,18
Зворотний потік газоподібного водню (точка 17V)		458,2		
Рідкий продукт (точка 17L)		22,7		

Визначення продуктивності водневого зріджувача зводиться до обчислення витрати потоку циркулюючого водню, узгодженого з холодопродуктивністю неонових рефрижераторів Q_{XNe} . З балансу дросельного ступеню водневого контуру (див. рис. 2, а) випливає, що в режимі одержання ортоводню

$$G_{KH_2} \cdot h_{12} + G_{KH_2} \cdot q_{пв} = (G_{KH_2} - g_{LH_2}) \cdot h_{18} + g_{LH_2} \cdot h_{17L} + Q_{XNe}, \quad (6)$$

де G_{KH_2} – витрата циркулюючого водню; g_{LH_2} – витрата зрідженого водню; $q_{пв} = 4$ кДж/кг – питомі теплоприпливи до дросельного ступеню зріджувача водню.

У розрахунку на 1 кг циркулюючого водню

$$h_{12} + q_{пв} = (1 - x_{H_2}) \cdot h_{18} + x_{H_2} \cdot h_{17L} + \frac{Q_{XNe}}{G_{KH_2}}. \quad (7)$$

Як встановлено розрахунком, для прийнятої конфігурації та ступеня компримування корисна холодопродуктивність неонових рефрижераторів становить $Q_{XNe} = 0,297$ кВт. Витрата циркулюючого водню G_{KH_2} , узгоджена з Q_{XNe} ,

$$G_{KH_2} = \frac{Q_x}{h_{12} + q_{пв} - h_{18} + x_{H_2} \cdot (h_{18} - h_{17L})}. \quad (8)$$

$$G_{KH_2} = \frac{0,297}{975,0 + 4 - 944,6 + 0,737 \cdot (944,6 - 22,7)} = 0,000416 \text{ кг/с};$$

$$V_{KH_2} = G_{KH_2} / \rho_{гв} = 0,000416 / 0,838 = 17,9 \text{ м}^3/\text{год}.$$

При коефіцієнті зрідження згідно з формулою (5) $x_{H_2} = 0,737$ витрата рідкого продукційного ортоводню становитиме $g_{LH_2} = 0,307$ г/с = 1,1 кг/год.

Об'ємна продуктивність установки

$$v_{LH_2} = g_{LH_2} / \rho_{ж} = 1,10 / 0,0683 = 16,2 \text{ дм}^3/\text{год.} \quad (9)$$

Питома витрата холодоагенту у водневому контурі (див. табл. 3)

$$g_{AH_2} = \frac{G_{AH_2}}{G_{KH_2}} = \frac{h_{11} - h_{12} - (1 - x_{H_2}) \cdot (h_{19} - h_{18}) + q_{1B}}{h_{10} - h_9}. \quad (10)$$

З урахуванням $G_{KH_2} = 0,000417$ кг/с споживання рідкого азоту дорівнюватиме $G_{AH_2} = 0,00238$ кг/с = 8,6 кг/год.

Розраховані параметри H_2 -циклу характерні для отримання ортоводню. Як відомо [1], нормальний водень складається із двох модифікацій – ортоводню і параводню, співвідношення яких визначається температурою. При параметрах довкілля концентрація параводню становить приблизно 25 %. Після зрідження водню з таким складом мимоволі відбувається конверсія, внаслідок чого концентрація параводню досягає 97 %. Процес конверсії водню супроводжується виділенням теплоти. В результаті за добу одна п'ята частина кріогенної рідини перейде до газової фази.

Для забезпечення тривалого зберігання зріджений водень необхідно перевести в стійку пара-модифікацію шляхом відведення теплоти конверсії в зріджувачі. Зазвичай такий процес проводять у два етапи (реактори R1 та R2, рис. 3). У реакторі R1 на азотному рівні відводиться теплота конверсії $q_{R1} = 195$ кДж/кг H_2 , при цьому концентрація параводню в потоці підвищується до 54 %. У реакторі R2 при $T_{R2} = 30$ К до киплячого неону відводиться теплота в кількості $q_{R2} = 300$ кДж/кг H_2 .

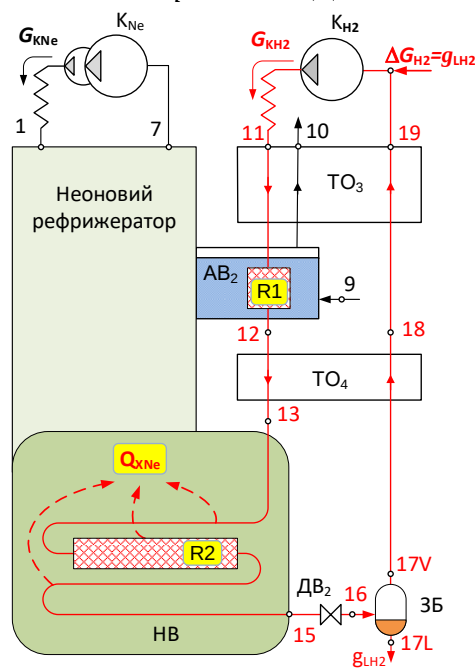


Рисунок 3 – Схема водневого блоку з реактором R2 у неоновій ванні Ne-циклу:

ЗБ – збірник-сепаратор водню; АВ₂ – азотна ванна [$T_9 = 67$ К; $(T_{12} - T_9) = 5$ К];

G_{KH_2} – витрата газу в компресорі

При заданій холодопродуктивності неоновому рефрижератору $Q_{\text{хНе}}$ внаслідок додаткового теплового навантаження q_{R2} витрата водню $G_{\text{кН2}}$, що циркулює, зменшується. При незмінному коефіцієнті зрідження $x_{\text{Н2}} = 0,737$ це призводить до зменшення продуктивності зріджувача $v_{\text{ЛН2}}$ з 16,2 до 12,3 $\text{дм}^3/\text{год}$ (табл. 6).

Таблиця 6 – Характеристики багатоцільової установки для отримання рідких кріопродуктів

Режим роботи	Витрата продукту, $\text{дм}^3/\text{год}$	Продуктивність ком- пресорів, $\text{нм}^3/\text{год}$		Споживання рідкого азоту, $\text{кг}/\text{год}$
		Неоновий	Водневий	
Рідкий ортоводень	17,9	40	17,9	13,5
Рідкий параводень	13,6		13,6	11,9
Рідкий неон	7,0		-	9,7

Відповідно до проекту створено дослідний зразок комбінованої воднево-неонової системи (рис. 4).

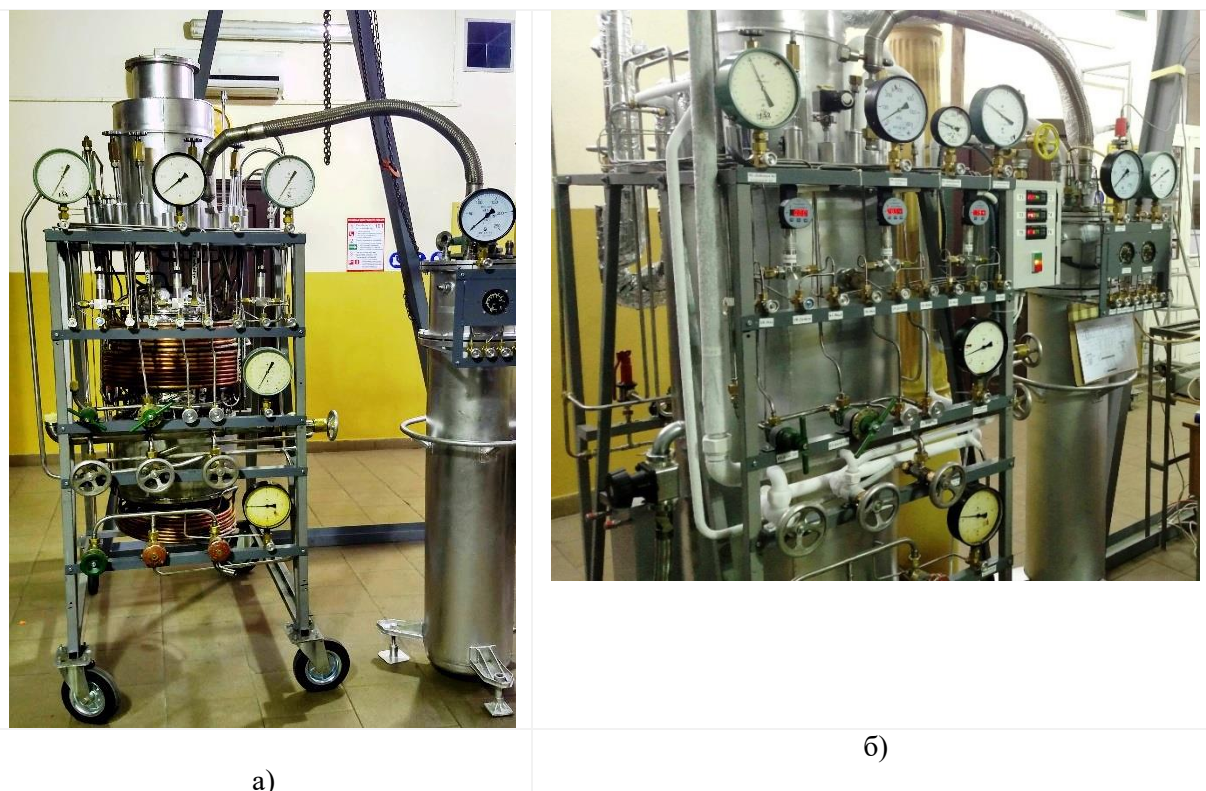


Рисунок 4 – Зріджувач водню та неоновий рефрижератор на стадії монтажу (а) та в процесі випробувань (б)

Установка призначена для лабораторних досліджень конструкційних властивостей матеріалів та низькотемпературної ізоляції в інтервалі температур 21...30 К.

Висновки

У наш час відчувається потреба у маловитратних зріджувачах водню. Найбільш простими є зріджувачі, що працюють за дросельним циклом високого тиску ($P \approx 15$ МПа). Через низьку температуру інверсії у водневому циклі застосовують рідкий азот.

Досліджено можливість використання водневих зріджувачів шляхом поєднання водневого та гелієвого контурів. У цьому випадку виключається частина обладнання, що працює на газоподібному водні, а також зростає його економічність. При такій побудові установки, що має два робочі тіла, вдається знизити тиск водню до 5,5 МПа.

Подальше вдосконалення неоновієї установки дозволило на основі двох компресорів 4,0 МК-20/200 у рефрижераторному режимі досягти холодопродуктивності 297 Вт. При $P = 1$ МПа перепад температур між рівноважними воднем і неоном у ванні НВ становитиме 3,7 К.

У результаті можна стверджувати, що створено досить ефективну кріогенну багатоцільову установку, що складається з водневого зріджувача і неоновієї рефрижератора та призначена для проведення досліджень в інтервалі температур 21...30 К.

Література

1. Naseem K., Qin F., Khalid F., Suo G., Zahra T., Chen Z., Javed Z. Essential parts of hydrogen economy: hydrogen production, storage, transportation and application. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2025. Vol. 210. A. 115196.
2. Glowacki B. A., Nuttal W. J. Hydrogen as a fuel and as a coolant – from the superconductivity perspective. *Journal of Energy Science*. 2010. Vol. 1. P. 15–29.
3. Hirabayashi H., Makida Y., Nomura S., Shintomi T. Liquid hydrogen cooled superconducting magnet and energy storage. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. 2008. Vol. 18, No. 2. P. 766.
4. Kamiya K., Takahashi H., Numazawa T., Nozawa H., Yanagitani T. Hydrogen liquefaction by magnetic refrigeration. In: Miller S. D., Ross R. G. Jr (eds). *Proceedings of the Fourteenth Conference on Cryocoolers*. Boulder, CO, 2007. P. 637–644.
5. Vasilyev A., Bezymyannykh B., Ganzha V. et al. Cryogenic system for continuous ultrahigh hydrogen purification in circulation mode. *NHA Annual Hydrogen Conference*. Washington, DC, 2005. P. 1–15.
6. Alekseev I., Fedorchenko O., Kravtsov P., Vasilyev A., Vznuzdaev M. Experimental results of hydrogen distillation at the low power cryogenic column for the production of deuterium depleted hydrogen. *Fusion Science and Technology*. 2008. Vol. 54, No. 2. P. 407–410.
7. Bondarenko V. L., Pylypenko B. O., Tyshko D. P. Refrigeration cycles in units for neon and its stable isotopes production. *Proceedings of the 6th International Conference on Cryogenics and Refrigeration*. 2018. No. 179. P. 315–316.
8. Bondarenko V., Symonenko I., Chyhrin A. Cooling systems at temperature level $T = 28$ –30 K. *Proceedings of the 17th International Refrigeration and Air Conditioning Conference at Purdue*. 2018. ID: 2163.
9. Bondarenko V., Arkharov A., Poddubna M., Symonenko I. Production of stable neon isotope by method of low temperature rectification. *Proceedings of the 24th IIR International Congress of Refrigeration*. 2015. P. 225–231.

10. Bondarenko V. L., Symonenko Y. M., D'yachenko O. V. Neon throttle liquefiers in installations for producing light inert gases and neon isotopes. *The International Conference on Cryogenics and Refrigeration (ICCR'2008)*. 2008. P. 239–243.
11. Bondarenko V. L., Arkharov A. M., Golubev A. A., Kapralov P. V., Savinov M. Y., Symonenko Y. M., Purtov S. N., Rura V. N., Volynskii B. I. Pilot-commercial plant for high purity neon production. *Preprints of the XX International Congress of Refrigeration*. 1999. P. 1–5.
12. Bondarenko V. L., Symonenko Iu. M., Chyhrin A. A. Separation of neon into isotope components by the distillation method. *Proceedings of the 2nd International Conference on Cryogenics and Refrigeration Technologies*. 2018. P. 60–68.
13. Bondarenko V., Chyhrin A., Bashkirov H. Cryogenic support of rectification units for the neon isotopes production. *The XXII International Conference with International Participation "New Cryogenic and Isotope Technologies for Energy and Environment"*. 2018. Vol. 1. P. 88–89.
14. Yamanishi T., Kinoshita M. Preliminary experimental study for cryogenic distillation column with small inner diameter. *Journal of Nuclear Science and Technology*. 1984. Vol. 21. P. 853–861.
15. Schultz K. R. Use of the modular helium reactor for hydrogen production. *General Atomics Project 04962*. 2003. P. 1–9.
16. Yamada S. S., Hishinuma Y., Uede T., Schippl K., Yanagi N., Mito T., Sato M. Conceptual design of 1 GW class hybrid energy transfer line of hydrogen and electricity. *Journal of Physics: Conference Series*. 2010. Vol. 234. A. 032064.
17. Silk E. A. Introduction to spacecraft thermal design. *Cambridge University Press*, 2020. 355 p.
18. Zhou K., Chen L., Li S., Zhao K., Zhang Z., Chen S., Hou Y. Comparative analysis of energy losses in hydrogen and helium turbo-expanders for hydrogen liquefiers. *Applied Thermal Engineering*. 2023. Vol. 227. A. 120322.
19. Xiong L., Yang K., Yang Z., Wei Z., Xu X., Zhu J., Lu C. Design and commissioning of a medium-scale hydrogen liquefaction plant. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2024. Vol. 1327. 012105.
20. Bondarenko V., Dalakov P., Symonenko I., Matveev E. The analysis of refrigeration cycles in the technologies of producing neon and its stable isotopes at $T = 28$ K. *Refrigeration Science and Technology Proceedings*. 2017. P. 243–248.
21. Bondarenko V., Symonenko I., Chyhrin A. Comparison of refrigeration cycles used for production of pure neon and its isotopic components. *Proceedings of the 8th International Conference on Compressors and Refrigeration*. 2017. F. 19. P. 1–7.

Bibliography (transliterated)

1. Naseem K., Qin F., Khalid F., Suo G., Zahra T., Chen Z., Javed Z. Essential parts of hydrogen economy: hydrogen production, storage, transportation and application. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2025. Vol. 210. A. 115196.
2. Glowacki B. A., Nuttal W. J. Hydrogen as a fuel and as a coolant – from the superconductivity perspective. *Journal of Energy Science*. 2010. Vol. 1. P. 15–29.

3. Hirabayashi H., Makida Y., Nomura S., Shintomi T. Liquid hydrogen cooled superconducting magnet and energy storage. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. 2008. Vol. 18, No. 2. P. 766.
4. Kamiya K., Takahashi H., Numazawa T., Nozawa H., Yanagitani T. Hydrogen liquefaction by magnetic refrigeration. In: Miller S. D., Ross R. G. Jr (eds). *Proceedings of the Fourteenth Conference on Cryocoolers*. Boulder, CO, 2007. P. 637–644.
5. Vasilyev A., Bezymyannykh B., Ganzha V. et al. Cryogenic system for continuous ultrahigh hydrogen purification in circulation mode. *NHA Annual Hydrogen Conference*. Washington, DC, 2005. P. 1–15.
6. Alekseev I., Fedorchenko O., Kravtsov P., Vasilyev A., Vznuzdaev M. Experimental results of hydrogen distillation at the low power cryogenic column for the production of deuterium depleted hydrogen. *Fusion Science and Technology*. 2008. Vol. 54, No. 2. P. 407–410.
7. Bondarenko V. L., Pylypenko B. O., Tyshko D. P. Refrigeration cycles in units for neon and its stable isotopes production. *Proceedings of the 6th International Conference on Cryogenics and Refrigeration*. 2018. No. 179. P. 315–316.
8. Bondarenko V., Symonenko I., Chyhrin A. Cooling systems at temperature level $T = 28\text{--}30\text{ K}$. *Proceedings of the 17th International Refrigeration and Air Conditioning Conference at Purdue*. 2018. ID: 2163.
9. Bondarenko V., Arkharov A., Poddubna M., Symonenko I. Production of stable neon isotope by method of low temperature rectification. *Proceedings of the 24th IIR International Congress of Refrigeration*. 2015. P. 225–231.
10. Bondarenko V. L., Symonenko Y. M., D'yachenko O. V. Neon throttle liquefiers in installations for producing light inert gases and neon isotopes. *The International Conference on Cryogenics and Refrigeration (ICCR'2008)*. 2008. P. 239–243.
11. Bondarenko V. L., Arkharov A. M., Golubev A. A., Kapralov P. V., Savinov M. Y., Symonenko Y. M., Purtov S. N., Rura V. N., Volynskii B. I. Pilot-commercial plant for high purity neon production. *Preprints of the XX International Congress of Refrigeration*. 1999. P. 1–5.
12. Bondarenko V. L., Symonenko Iu. M., Chyhrin A. A. Separation of neon into isotope components by the distillation method. *Proceedings of the 2nd International Conference on Cryogenics and Refrigeration Technologies*. 2018. P. 60–68.
13. Bondarenko V., Chyhrin A., Bashkirov H. Cryogenic support of rectification units for the neon isotopes production. *The XXII National Conference with International Participation "New Cryogenic and Isotope Technologies for Energy and Environment"*. 2018. Vol. 1. P. 88–89.
14. Yamanishi T., Kinoshita M. Preliminary experimental study for cryogenic distillation column with small inner diameter. *Journal of Nuclear Science and Technology*. 1984. Vol. 21. P. 853–861.
15. Schultz K. R. Use of the modular helium reactor for hydrogen production. *General Atomics Project 04962*. 2003. P. 1–9.
16. Yamada S. S., Hishinuma Y., Uede T., Schippl K., Yanagi N., Mito T., Sato M. Conceptual design of 1 GW class hybrid energy transfer line of hydrogen and electricity. *Journal of Physics: Conference Series*. 2010. Vol. 234. A. 032064.
17. Silk E. A. Introduction to spacecraft thermal design. *Cambridge University Press*, 2020. 355 p.

18. Zhou K., Chen L., Li S., Zhao K., Zhang Z., Chen S., Hou Y. Comparative analysis of energy losses in hydrogen and helium turbo-expanders for hydrogen liquefiers. *Applied Thermal Engineering*. 2023. Vol. 227. A. 120322.

19. Xiong L., Yang K., Yang Z., Wei Z., Xu X., Zhu J., Lu C. Design and commissioning of a medium-scale hydrogen liquefaction plant. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2024. Vol. 1327. 012105.

20. Bondarenko V., Dalakov P., Symonenko I., Matveev E. The analysis of refrigeration cycles in the technologies of producing neon and its stable isotopes at $T = 28$ K. *Refrigeration Science and Technology Proceedings*. 2017. P. 243–248.

21. Bondarenko V., Symonenko I., Chyhrin A. Comparison of refrigeration cycles used for production of pure neon and its isotopic components. *Proceedings of the 8th International Conference on Compressors and Refrigeration*. 2017. F. 19. P. 1–7.

УДК 621.564.27

Б. Г. Грудка, канд. техн. наук, доцент

ЗРІДЖУВАЧ ВОДНЮ З НЕОНОВИМ КРІОГЕННИМ РЕФРИЖЕРАТОРОМ

Мета наукової роботи – створення комбінованої установки для проведення досліджень в інтервалі температур 21...30 К. У даному випадку визнано раціональним використовувати водень або неон, у яких за цих умов спостерігається фазова рівновага «пара-рідина». У маловитратних зріджувачах водню застосовується дросельний цикл високого тиску (15 МПа) з охолодженням робочого тіла нижче інверсійної температури в азотних ваннах. Перспективним можна вважати поєднання водневого та гелієвого контурів. За рахунок використання двох робочих тіл виключається частина обладнання, що працює на газоподібному водні, підвищується економічність та знижується тиск потоку водню, стиснутого до 5,5 МПа. Надалі, об'єднання водневого та гелієвого контурів дозволило підвищити економічність та зменшити тиск прямого потоку водню до 1 МПа. В результаті цього в ступені компримування водню запропоновано застосовувати одноступеневі компресори. На відміну від воднево-гелієвих систем, відведення тепла від водню відбувається з меншими термодинамічними втратами при стабільній температурі киплячого кріоагенту (неону). Густина і прихована теплота пароутворення неону (на одиницю об'єму) істотно вище, ніж у водню, що зумовило його використання у якості робочого тіла у допоміжному рефрижераторному циклі з охолодженням прямого потоку у ванні з азотом, що кипить під вакуумом. Найбільш вагомими результатами є досягнення продуктивності комплексу в режимі зрідження водню, що становить 18 і 13 $\text{дм}^3/\text{год}$ з урахуванням орто- і параконверсії, відповідно. Установка також здатна зріджувати неон з витратою 7 $\text{дм}^3/\text{год}$. Досягнуті результати вказують на можливість застосування рідкого неону для імітації умов, близьких до водневого рівня температур. За рахунок цього попереднє тестування водневого обладнання проводиться за допомогою безпечного кріоагенту.

Ключові слова: цикл високого тиску, діафрагмовий компресор, рідкий водень, рідкий неон, конверсія водню.

В. Н. Hrudka

HYDROGEN LIQUEFIER WITH A NEON CRYOGENIC REFRIGERATOR

The aim of the research work is to create a combined unit for research in the temperature range of 21...30 K. It was considered rational to use hydrogen or neon, which under these conditions have a phase equilibrium "vapor-liquid". In low-consumption hydrogen liquefiers a high-pressure (15 MPa) throttle cycle with cooling of the working media below the inversion temperature in nitrogen baths is used. Combination of hydrogen and helium circuits can be considered promising. Due to use of two working medium, a part of equipment working on gaseous hydrogen is excluded, efficiency is increased and hydrogen flow pressure, compressed to 5,5 MPa, is reduced. Further, combining hydrogen and helium circuits allowed to increase economy and reduce pressure of direct hydrogen flow to 1 MPa. As a result, single-stage compressors were used in the hydrogen compression stage. In contrast to hydrogen-helium systems, heat removal from hydrogen occurs with less thermodynamic losses at a stable temperature of the boiling cryoagent (neon). The density and latent heat of vaporization of neon (per unit volume) is significantly higher than that of hydrogen, which led to its use as a working media in the auxiliary refrigeration cycle with direct flow cooling in a bath of nitrogen, boiling under vacuum. The most significant can be considered the achievement of the productivity of the complex in the hydrogen liquefaction mode, which is 18 and 13 dm³/h, taking into account the ortho- and paraconversion, respectively. The unit is also capable of liquefying neon at a flow rate of 7 dm³/h. The results achieved indicate that liquid neon can be used to simulate conditions close to the hydrogen temperature level. Due to this, pre-testing of hydrogen equipment is performed with a relatively safe cryoagent.

Keywords: high-pressure cycle, diaphragm compressor, liquid hydrogen, liquid neon, hydrogen conversion.

Отримано редколегією 26.01.2026

Грудка Богдан Геннадійович (Bohdan Hrudka), канд. техн. наук, доцент, доцент Одеського національного технологічного університету, <https://orcid.org/0000-0003-1200-5442>.

Д. В. Мірошниченко, д-р техн. наук, професор, Л. А. Лисенко, аспірант,
С. Л. Жаров, аспірант, О. В. Квасов, аспірант, Д. К. Кузін, аспірант,
В. В. Марченко, аспірант, С. А. Набока, аспірант

ХІМІЧНА ТЕХНОЛОГІЯ ТА КОРОЗІЙНА ПОВЕДІНКА ПРОМИСЛОВИХ СИСТЕМ ЛАКОФАРБОВИХ ПОКРИТТІВ «ГРУНТ-ЕМАЛЬ» НА ВУГЛЕЦЕВІЙ СТАЛІ

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків

Ключові слова: антикорозійні покриття; промислові ґрунтовки та емалі; фосфат цинку; показники якості покриття; корозійна стійкість; взаємозв'язок між складом і характеристиками.

1. Вступ. Корозія металевих конструкцій залишається однією з ключових проблем промисловості, що спричиняє значні економічні втрати та скорочення терміну служби обладнання. Найпоширенішими методами захисту є органічні покриття на основі ґрунтівок і емалей завдяки їх універсальності та ефективності. Їх антикорозійні властивості визначаються не лише хімічним складом, але й цілісністю плівки, адгезією та стабільністю захисних механізмів [1, 2].

Промислові ґрунт-емалеві системи забезпечують захист за рахунок бар'єрного, інгібуючого та міжфазного механізмів. Бар'єрний ефект обмежує проникнення агресивних агентів, інгібітори пригнічують електрохімічні реакції, а міжфазна стабільність запобігає підплівковій корозії. Ефективність цих механізмів залежить від складу системи, зокрема пігментів, сполучних і функціональних добавок [3].

Серед пігментів широко застосовується фосфат цинку, який сприяє утворенню захисних шарів і підвищує адгезію. Для посилення ефекту використовують органічні інгібітори та адгезійні добавки, зокрема силанові модифікатори [4, 5].

Разом із тим, існуючі дослідження часто розглядають антикорозійні властивості окремо або на основі спрощених моделей, що не враховують реальні технологічні умови. Це ускладнює встановлення чітких зв'язків між складом покриття, якістю плівки та корозійною поведінкою [6, 7].

Метою даного дослідження є систематичне вивчення впливу складових рецептури на антикорозійні властивості ґрунт-емалевих систем. Було підготовлено вісім варіантів покриттів із варіюванням вмісту фосфату цинку, органічних інгібіторів та міжфазних добавок при однакових умовах нанесення. Оцінка проводилась у єдиній експериментальній системі для встановлення взаємозв'язків між складом і властивостями.

1.1 Огляд літератури. Органічні ґрунт-емалеві покриття є ефективним методом захисту сталевих конструкцій завдяки поєднанню бар'єрного, інгібуючого та адгезійного механізмів [8, 9].

Бар'єрний захист базується на обмеженні проникнення вологи та кисню. Його ефективність визначається товщиною та суцільністю плівки, тоді як дефекти значно прискорюють корозію [10].

Інгібуючий ефект забезпечується антикорозійними пігментами, серед яких фосфат цинку є одним із найефективніших завдяки здатності формувати захисні фосфатні шари. Органічні інгібітори додатково блокують активні центри корозії, діючи переважно на межі розділу фаз.

Важливим фактором є адгезія покриття до металу. Її покращують за допомогою силанових добавок, які підвищують стійкість до розшарування та підплівкової корозії.

Більшість досліджень аналізує окремі механізми, що обмежує розуміння їх комбінованої дії в реальних системах. Останні роботи підкреслюють необхідність комплексного підходу, який враховує склад, структуру плівки та корозійну поведінку одночасно.

1.2 Постановка проблеми. Незважаючи на широке застосування ґрунт-емалевих систем, їх раціональне проектування залишається складним через взаємодію кількох захисних механізмів. Існуючі дослідження рідко встановлюють чіткі кількісні зв'язки між складом, якістю покриття та корозійною стійкістю в однакових умовах.

Відсутність системного підходу призводить до того, що покриття зі схожим складом можуть мати різні властивості. Вплив пігментів, інгібіторів і міжфазних характеристик часто недостатньо оцінених.

Метою роботи є створення експериментальної бази для оцінки антикорозійних властивостей шляхом варіювання складу при сталих технологічних умовах. Передбачено аналіз якості плівки, адгезії та корозійної стійкості з подальшим встановленням взаємозв'язків між складом і експлуатаційними характеристиками.

2. Методологія. Методологія дослідження спрямована на відображення хіміко-технологічного підходу до розробки та оцінки антикорозійних покриттів. Вона охоплює підготовку ґрунтів і емалей (розробку рецептури, обробку, нанесення на сталеві основи) та оцінку їх антикорозійної ефективності. Підхід поєднує етапи підготовки покриття з показниками його якості та корозійною поведінкою, а чисельне моделювання використовується як допоміжний інструмент для інтерпретації експериментальних результатів.

2.1. Загальний методологічний підхід та межі дослідження. Методологія базується на принципах хімічної технології антикорозійних покриттів і охоплює підготовку, нанесення та оцінку ґрунтів і емалей для захисту вуглецевої сталі. Основна мета – дослідити вплив складу та технологічної обробки на якість покриття й його антикорозійні властивості.

У роботі акцент зроблено на технологічному процесі отримання покриттів (змішування, диспергування, нанесення, затвердіння). Корозійну активність оцінюють на покритих зразках, а чисельне моделювання використовується як допоміжний інструмент. Структуру та етапи дослідження подано у вигляді блок-схеми.

2.2. Матеріали та антикорозійні системи покриттів. Об'єктом дослідження є промислові антикорозійні ґрунтовки та емалі, що застосовуються окремо або в системі

«ґрунтовка-емаль» для захисту сталевих конструкцій в агресивних середовищах. Для демонстрації промислової значущості експериментальної процедури на рисунку 1 представлено типовий приклад високошвидкісного диспергуючого обладнання, що використовується для введення пігменту та наповнювача під час підготовки покриття.



Рисунок 1 – Промисловий високошвидкісний диспергатор для приготування ґрунт-емалевих композицій

Для ґрунтовок обрано епоксидні системи завдяки їх високій адгезії, хімічній стійкості та здатності формувати щільні захисні плівки. Емалі на основі алкідних і акрилових сполучних використовувалися як фінішні покриття для підвищення бар'єрних властивостей і стійкості до зовнішніх впливів. Основним антикорозійним пігментом був фосфат цинку, що утворює захисні шари та пригнічує корозійні процеси.

Досліджені ґрунтовки включали двокомпонентну епоксидну систему на основі DGEBA з поліамідним затверджувачем та водну епоксидну дисперсію. Емалі створено на базі алкідних (з лаком PF-060, оксидом заліза) та акрилових систем. До окремих складів додавали органічні інгібітори корозії (бензотриазол/толілтриазол) і силанові промотори адгезії.

2.3. Підготовка та розробка рецептур антикорозійних покриттів. Підготовка ґрунтів і емалей здійснювалася за контрольованою процедурою: полімерне сполучне кондиціонували при кімнатній температурі, після чого поступово вводили пігменти й наповнювачі при перемішуванні для рівномірного змочування. Диспергування проводили до отримання стабільної однорідної суспензії, що визначає бар'єрні властивості покриття. Далі додавали функціональні добавки для регулювання реології та плівко-

утворення. У двокомпонентних епоксидних системах затверджувач вводили перед нанесенням, після чого суміш витримували для стабілізації та видалення повітря.

2.4. Варіанти покриттів та диференціація рецептур. Було підготовлено кілька варіантів ґрунтовок і емалей, що відрізнялися складом сполучного та функцією в системі захисту. Їх характеристики наведені в таблиці 1.

Таблиця 1 – Характеристики складів досліджуваних антикорозійних систем «ґрунт–емаль»

Варіант	Система покриття	ґрунт сполучник	Емаль сполучник	Цинк фосфат рівень	Органічний інгібітор	Силан промотор
V1	ґрунт + емаль	Епоксид-ефір	Алکید	Базовий	Ні	Ні
V2	ґрунт + емаль	Епоксид-ефір	Алکید	Базовий	Так	Ні
V3	ґрунт + емаль	Епоксид-ефір	Алکید	Базовий	Ні	Так
V4	ґрунт + емаль	Епоксид-ефір	Алکید	Базовий	Так	Так
V5	ґрунт + емаль	Епоху-ester	Алکید	Підвищений	Ні	Ні
V6	ґрунт + емаль	Епоху-ester	Алکید	Підвищений	Так	Ні
V7	ґрунт + емаль	Епоху-ester	Алکید	Підвищений	Ні	Так
V8	ґрунт + емаль	Епоху-ester	Алکید	Підвищений	Так	Так

Таблиця 1 показує, що кожен систему «ґрунт-емаль» досліджували у двох варіантах на основі базового рецепту. Відмінності полягали у вмісті фосфату цинку та додаванні органічних інгібіторів і силанів, що розширило експеримент без зміни основної хімії.

2.5. Нанесення ґрунтовок та емалей на сталеві підкладки. ґрунтовки та емалі наносили на очищену й знежирену вуглецеву сталь у контрольованих умовах. Використовували розпилення або пензель, забезпечуючи суцільні плівки без дефектів. Товщина сухої плівки становила 60–80 мкм для ґрунтів і 40–60 мкм для емалей; шари наносили послідовно після висихання попереднього. Затвердіння проходило в лабораторії: епоксидні системи зшивалися, емалі формували плівку після випаровування розчинника. Контролювали в'язкість, режими нанесення та час життєздатності сумішей.

2.6. Оцінювання антикорозійної активності покриттів. Антикорозійну ефективність покриттів оцінювали в умовах, наближених до промислових, за ознаками деградації: підплівковою корозією, пухирцями, відшаруванням і втратою адгезії. Порів-

нювали різні склади для виявлення тенденцій і зв'язку між якістю покриття та корозійною стійкістю, що відповідає практичним підходам.

2.7. Модельна інтерпретація корозійних процесів. Для пояснення експериментальних результатів використано чисельну модель, що описує транспорт агресивних речовин і дію інгібіторів у покриттях та дозволяє оцінити вплив якості плівки на корозію.

По-перше, потік агресивних речовин через шар покриття було описано за допомогою залежності, що базується на дифузії:

$$J = \frac{D_{eff} (C_{ext} - C_{int})}{L}, \quad (1)$$

де J – потік агресивних речовин через покриття ($\text{моль} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$), D_{eff} – ефективний коефіцієнт дифузії агресивних речовин у покритті ($\text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$), C_{ext} – концентрація агресивних речовин на зовнішній поверхні покриття ($\text{моль} \cdot \text{м}^{-3}$), C_{int} – концентрація на межі розділу метал-покриття ($\text{моль} \cdot \text{м}^{-3}$), L – товщина покриття (м).

Це рівняння відображає бар'єрний ефект покриття, який в першу чергу визначається товщиною та суцільністю плівки, що залежать від умов нанесення та затвердіння.

Вплив пористості покриття та структури дефектів на масоперенесення враховувався за допомогою ефективного коефіцієнта дифузії:

$$D_{eff} = D_0 (1 - \phi)^n, \quad (2)$$

де D_0 – коефіцієнт дифузії в полімерній матриці без дефектів ($\text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$), ϕ – об'ємна пористість покриття (безрозмірна величина), n – структурний показник, що відображає зв'язність пор і дефектів.

Ця залежність встановлює прямий зв'язок між якістю дисперсії пігменту, утворенням плівки та стійкістю покриття до проникнення електроліту.

Нарешті, ефективність інгібування корозії, що забезпечується антикорозійними пігментами, була оцінена за допомогою параметра ефективності інгібування:

$$\eta_{inh} = 1 - \frac{i_{corr}}{i_{corr}^0}, \quad (3)$$

де η_{inh} – ефективність інгібування (безрозмірна величина), i_{corr}^0 – щільність корозійного струму за відсутності інгібіторів ($\text{А} \cdot \text{м}^{-2}$), i_{corr} – щільність корозійного струму за наявності антикорозійних пігментів ($\text{А} \cdot \text{м}^{-2}$).

Параметр характеризує зниження корозійної активності завдяки пігментам.

Модель використано для інтерпретації впливу товщини, пористості та інгібіторів на корозійну стійкість покриттів.

2.8. Узагальнення методології дослідження. Методологія поєднує підготовку матеріалів, експериментальну оцінку та моделювання, що дозволяє встановити зв'язок між технологією, якістю покриття й антикорозійними властивостями.

3. Результати

Усі покриття досліджували в однакових умовах, що дало змогу порівняти вплив рецептури. Аналіз охоплює вісім систем із різним вмістом фосфату цинку, інгібіторами та силанами, з акцентом на якість плівки та її зв'язок із корозійною стійкістю.

3.1. Огляд результатів експериментів та методики їх оцінювання. Експерименти проводилися в однакових контрольованих умовах, тому всі відмінності між покриттями зумовлені лише їх складом. Досліджено вісім варіантів (V1–V8), що відрізнялися вмістом фосфату цинку, наявністю інгібіторів і силанів при однакових технологічних параметрах, що дозволило ізолювати вплив кожного чинника.

Оцінювали показники якості покриття (товщина, адгезія, дефекти, активність інгібіторів) і корозійну стійкість. Аналіз базувався на порівняльному підході – визначенні відносних тенденцій між варіантами. Спочатку розглядали якість плівки, далі – корозійну поведінку, а потім їх взаємозв'язок для пояснення механізмів захисту.

3.2. Показники якості систем «грунт-емаль». Для всіх варіантів (V1–V8) проаналізовано показники якості, що характеризують формування плівки та міжфазні властивості. Порівняння виконано за однакових умов, тому результати відображають вплив саме складу покриттів.

Таблиця 2 – Показники якості покриттів досліджуваних варіантів систем «грунт-емаль» (V1-V8)

Варіант	Товщина сухої плівки, μm	Адгезія (ISO 2409)	Щільність дефектів, бал (0-5)	Ефективність інгібітору, %
V1	85 ± 5	3	4	0
V2	88 ± 6	3	4	32
V3	90 ± 5	1	3	0
V4	92 ± 6	1	3	35
V5	112 ± 7	3	2	0
V6	115 ± 8	3	2	41
V7	118 ± 6	0	1	0
V8	120 ± 7	0	1	46

Кількісні показники (табл. 2) демонструють чіткі відмінності між варіантами покриттів. Збільшення вмісту фосфату цинку підвищує товщину сухої плівки ($\approx 85\text{--}92$ до $112\text{--}120$ мкм) і покращує бар'єрні властивості. Адгезія суттєво зростає при використанні силанів: від середнього рівня (клас 3) до високого (класи 1–0), що свідчить про краще зчеплення зі сталлю.

Щільність дефектів зменшується при збільшенні вмісту пігменту та модифікації силанами, що вказує на більш однорідну структуру плівки. Органічні інгібітори майже не впливають на товщину й адгезію, але підвищують ефективність захисту ($\approx 32\text{--}46\%$). Загалом: товщина залежить від пігменту, адгезія — від міжфазної хімії, інгібування — окремий фактор.

3.3. Показники корозійного руйнування після випробувань Після випробувань оцінено ступінь деградації покриттів за однакових умов. Аналіз базується на вимірюваних показниках пошкодження, що відображають руйнування бар'єру та втрату адгезії; результати наведені в таблиці 3.

Таблиця 3 – Кількісні показники корозійного руйнування систем «грунт–емаль» після випробувань (V1–V8)

Варіант	Час до появи першої видимої корозії, год.	Площа корозійного ураження, %	Довжина відшарування, мм	Адгезія після випробувань (ISO 2409)
V1	120	18	12	4
V2	170	15	11	4
V3	180	12	7	2
V4	210	10	6	2
V5	240	9	8	3
V6	290	7	7	3
V7	320	4	3	1
V8	380	2	1	1

Базова система ґрунтовка-емаль (V1) продемонструвала найраніше початок корозії, причому перші видимі продукти корозії були виявлені приблизно через 120 годин впливу, площа ураження сягала 18 %, спостерігалось значне відшарування (до 12 мм) і низька адгезія (клас 4). Це свідчить про швидке проникнення електроліту та слабкий захист.

Додавання інгібітора (V2) затримало корозію до ~170 год і зменшило її площу до 15 %, але майже не вплинуло на відшарування й адгезію. Варіанти з силанами (V3–V4) дали кращий результат: початок корозії 180–210 год, площа 10–12 %, менше відшарування (6–7 мм) і краща адгезія (клас 2).

Системи з високим вмістом цинку (V5–V8) показали найвищу стійкість: площа корозії 2–9 %, початок — 240–380 год, мінімальне відшарування (1–3 мм) і краща адгезія. Найефективнішою була V8.

3.4. Тенденції корозійної стійкості залежно від варіацій рецептур. Порівняльний аналіз (V1–V8) показує вплив складу – вмісту фосфату цинку, інгібіторів і силанів – на стійкість покриттів.

На рисунку 2 представлено індекс корозійної стійкості (CRI) у вигляді компактної візуалізації кількісних показників пошкодження після впливу, підсумованих у таблиці 3.

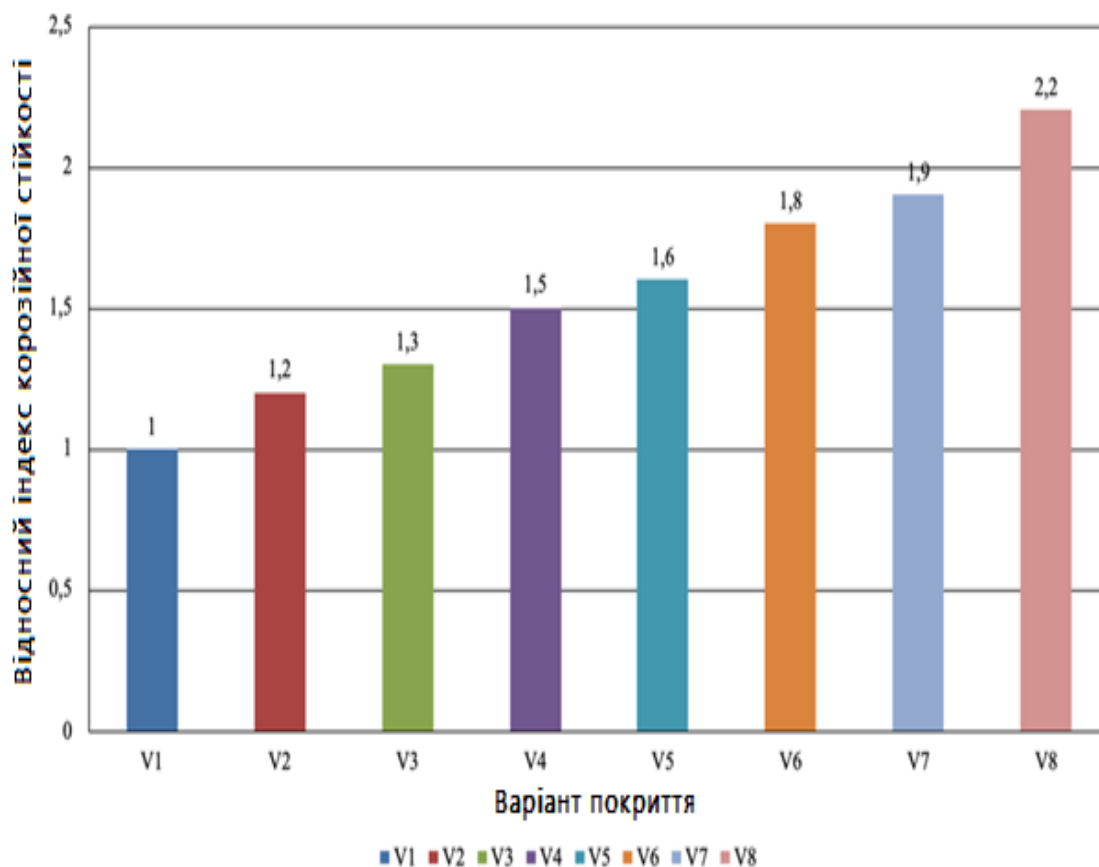


Рисунок 2 – Вплив рецептурних факторів на корозійну стійкість ґрунт-емалевих систем

На рисунку 2 показано порівняльний індекс корозійної стійкості для досліджуваних варіантів покриття (V1–V8), що підкреслює вплив вмісту фосфату цинку, додавання органічного інгібітора та посилення адгезії силану за однакових умов випробування.

Встановлено, що підвищення вмісту фосфату цинку стабільно покращує стійкість завдяки бар'єрному ефекту та пасивації, незалежно від наявності інгібіторів.

Органічні інгібітори додатково знижують швидкість і поширення корозії, пригнічуючи електрохімічні процеси. Силани покращують адгезію та зменшують підплівкову корозію, обмежуючи відшарування.

Найкращі результати досягнуті при поєднанні всіх трьох факторів (високий фосфат, інгібітори, силани), що свідчить про їх синергію. Загалом ефективність визначається комплексною дією цих чинників, а не одним параметром.

3.5. Узагальнення ключових результатів експериментальних досліджень.

Антикорозійні властивості визначаються поєднанням факторів: пігменту (бар'єр), адгезії (силани) та інгібіторів. Найкращі результати досягаються їх синергією, що забезпечує щільну плівку, міцне зчеплення та ефективне пригнічення корозії.

4. Обговорення результатів. Результати підтверджують, що антикорозійна ефективність систем «грунт-емаль» визначається сукупною дією бар'єрних, інгібуючих і міжфазних механізмів, а не окремими параметрами складу. Зміна вмісту фосфату цинку, інгібіторів і силанів за однакових умов дозволила оцінити їхній вплив на властивості покриттів.

Фосфат цинку підвищує щільність і бар'єрність плівки, силани покращують адгезію та зменшують підплівкову корозію, а інгібітори забезпечують електрохімічне пригнічення. Водночас бар'єрні властивості самі по собі недостатні без хорошої міжфазної адгезії.

Корозійна стійкість найкраща при поєднанні всіх трьох механізмів, що підтверджує їх взаємозалежність. Кореляційний аналіз показує, що якість покриття (щільність, адгезія) є надійнішим показником, ніж склад окремо.

Літературні дані узгоджуються з результатами: фосфати впливають на мікроструктуру, силани зміцнюють міжфазний зв'язок, а інгібітори діють електрохімічно. Найвища стійкість досягається лише при їх інтеграції в єдину систему [11, 12].

У цілому показано, що оптимізація антикорозійних покриттів базується на збалансованому поєднанні бар'єрного формування, адгезії та інгібування, що забезпечує стабільну експлуатаційну ефективність.

5. Висновки. Досліджено антикорозійні властивості систем «грунт-емаль» за однакових технологічних умов із варіацією складу (фосфат цинку, інгібітори, адгезійні модифікатори). Встановлено чіткий зв'язок між рецептурою, якістю покриття та корозійною стійкістю.

Антикорозійний захист формується лише за рахунок поєднання кількох механізмів. Фосфат цинку підвищує бар'єрність і щільність плівки, силани покращують адгезію та зменшують підплівкову корозію, а органічні інгібітори забезпечують електрохімічне пригнічення. Найкращі результати досягаються при їх сумісній дії.

Ключовими індикаторами стійкості є щільність плівки, адгезія та активність інгібіторів, тоді як товщина має другорядне значення. Це підкреслює важливість оцінки реальних властивостей покриття, а не лише складу.

Отримані залежності можуть бути використані для оптимізації промислових систем «грунт-емаль», контролю якості та порівняльної оцінки ефективності. Подальші дослідження доцільно розширити на довготривалі та циклічні умови корозії й інші типи сполучних систем.

Література

1. Barros C., Muzeau B., L'Hostis V., François R. Impact of fluoride concentration on general corrosion of Mg-Zr alloy in a Na-geopolymer and alkaline solutions. *Corrosion Science*. 2020.
2. Xie W., Chen S., Wang S. Microstructure-dependent impact-abrasion-corrosion failure of hypoeutectic high chromium cast iron in chloride environments. *Journal of Materials Research and Technology*. 2025.
3. Zhang Y., Niu X., Zhou J. Surface corrosion inhibition mechanism of sarcosine as a green novel inhibitor on a novel barrier layer material of cobalt in copper film CMP for GLSI. *Materials Science in Semiconductor Processing*. 2022.
4. Gimeno M., Puig M., Chamorro S. Improvement of the anticorrosive properties of an alkyd coating with zinc phosphate pigments assessed by NSS and ACET. *Progress in Organic Coatings*. 2016.
5. Naderi R., Attar M. The role of zinc aluminum phosphate anticorrosive pigment in Protective Performance and cathodic disbondment of epoxy coating. *Corrosion Science*. 2010.
6. Ma T., Zhang C., Li D., Chen X. Molten salt electrochemical synthesis of high-thickness and high-purity Ti_2AlC MAX phase coatings. *Chemical Engineering Journal*. 2026.
7. Chakraborty A., Raja C., Badhan S., Sharma P. Sustainable antifouling coating technologies for the maritime industry: An evolutionary overview. *Progress in Organic Coatings*. 2026.
8. Sadia H., Jiang W., Zheng P. A novel PDMS-based coating incorporated with capsaicin and TiO_2 -modified CNTs: Performance and mechanisms of antifouling and anticorrosion in seawater. *Progress in Organic Coatings*. 2026.
9. Hao Y., Shen Y., Song L. Anticorrosion mechanism of mesoporous polyaniline hollow nanosphere loaded with 8-HQ in an epoxy coating for aluminum alloy. *Construction and Building Materials*. 2025.
10. Du X., Zhao Z., Cheng R., Liu J. Study the factors affecting the water vapor barrier properties of organic-inorganic hybrid coatings. *Ceramics International*. 2023.
11. Zhang L., Du W., Liu H. The development of double-barrier anticorrosion coating by embedding CNTs/MXene@ZnFe-MoO₄ LDH in the waterborne epoxy resin. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2026.
12. Guo Y., Qin Z., Liu S. Interfacial engineering in low-temperature titanium-based enamel coatings: SiO_2 -mediated trade-offs between barrier properties and adhesion. *Ceramics International*. 2025.

Bibliography (transliterated)

1. Barros C., Muzeau B., L'Hostis V., François R. Impact of fluoride concentration on general corrosion of Mg-Zr alloy in a Na-geopolymer and alkaline solutions. *Corrosion Science*. 2020.
2. Xie W., Chen S., Wang S. Microstructure-dependent impact-abrasion-corrosion failure of hypoeutectic high chromium cast iron in chloride environments. *Journal of Materials Research and Technology*. 2025.

3. Zhang Y., Niu X., Zhou J. Surface corrosion inhibition mechanism of sarcosine as a green novel inhibitor on a novel barrier layer material of cobalt in copper film CMP for GLSI. *Materials Science in Semiconductor Processing*. 2022.
4. Gimeno M., Puig M., Chamorro S. Improvement of the anticorrosive properties of an alkyd coating with zinc phosphate pigments assessed by NSS and ACET. *Progress in Organic Coatings*. 2016.
5. Naderi R., Attar M. The role of zinc aluminum phosphate anticorrosive pigment in Protective Performance and cathodic disbondment of epoxy coating. *Corrosion Science*. 2010.
6. Ma T., Zhang C., Li D., Chen X. Molten salt electrochemical synthesis of high-thickness and high-purity Ti_2AlC MAX phase coatings. *Chemical Engineering Journal*. 2026.
7. Chakraborty A., Raja C., Badhan S., Sharma P. Sustainable antifouling coating technologies for the maritime industry: An evolutionary overview. *Progress in Organic Coatings*. 2026.
8. Sadia H., Jiang W., Zheng P. A novel PDMS-based coating incorporated with capsaicin and TiO_2 -modified CNTs: Performance and mechanisms of antifouling and anticorrosion in seawater. *Progress in Organic Coatings*. 2026.
9. Hao Y., Shen Y., Song L. Anticorrosion mechanism of mesoporous polyaniline hollow nanosphere loaded with 8-HQ in an epoxy coating for aluminum alloy. *Construction and Building Materials*. 2025.
10. Du X., Zhao Z., Cheng R., Liu J. Study the factors affecting the water vapor barrier properties of organic-inorganic hybrid coatings. *Ceramics International*. 2023.
11. Zhang L., Du W., Liu H. The development of double-barrier anticorrosion coating by embedding CNTs/MXene@ZnFe-MoO₄ LDH in the waterborne epoxy resin. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2026.
12. Guo Y., Qin Z., Liu S. Interfacial engineering in low-temperature titanium-based enamel coatings: SiO_2 -mediated trade-offs between barrier properties and adhesion. *Ceramics International*. 2025.

УДК 667.633.263:620.193.2:669.14

Д. В. Мірошніченко, д-р техн. наук, професор, Л. А. Лисенко, аспірант,
С. Л. Жаров, аспірант, О. В. Квасов, аспірант, Д. К. Кузін, аспірант,
В. В. Марченко, аспірант, С. А. Набока, аспірант

ХІМІЧНА ТЕХНОЛОГІЯ ТА КОРОЗІЙНА ПОВЕДІНКА ПРОМИСЛОВИХ СИСТЕМ ЛАКОФАРБОВИХ ПОКРИТТІВ «ГРУНТ-ЕМАЛЬ» НА ВУГЛЕЦЕВІЙ СТАЛІ

Складні взаємодії між хімічним складом, цілісністю плівки та міжфазною стабільністю визначають антикорозійні властивості промислових систем ґрунтовки-емалі. У цьому дослідженні було систематично вивчено вплив ключових змінних складу на показники якості покриття та корозійну поведінку з використанням промислових епоксидних ґрунтовок та алкідних/акрилових емалей. Особливу увагу приділено ролі вмісту фосфату цинку, органічних інгібіторів корозії та силанних адгезійних промоторів у ко-

нтрольованих технологічних умовах. Було підготовлено вісім варіантів ґрунтовки-емалі на основі ідентичних систем сполучних речовин та режимів нанесення, що відрізнялися лише параметрами складу. Усі покриття наносили на сталеві основи за стандартизованих умов підготовки поверхні, затвердіння та формування плівки. Показники якості покриття, включаючи товщину сухої плівки, адгезію до сталі, щільність плівки, схильність до дефектів та функціональну активність інгібіторів, оцінювали для характеристики цілісності плівки перед оцінкою корозії.

Проаналізовано тенденції корозійної стійкості за допомогою порівняльної моделі, яка підкреслює відносні відмінності в характеристиках між варіантами складу. Результати показують, що характеристики покриття не можна пов'язати з одним фактором. Підвищений вміст фосфату цинку в першу чергу підвищив безперервність бар'єру та щільність плівки, тоді як силан-промотори адгезії значно поліпшили міжфазне зчеплення та зменшили схильність до корозії під плівкою. Органічні інгібітори корозії незалежно сприяли пригніченню корозії, обмежуючи електрохімічну активність на межі метал-покриття без зміни морфології плівки. Найвища корозійна стійкість була виявлена у складах, що поєднували поліпшені бар'єрні властивості, сильну адгезію та функціональність активних інгібіторів, що вказує на синергетичну взаємодію між структурними та функціональними механізмами захисту.

Отримані результати встановлюють чіткий взаємозв'язок між складом і характеристиками промислових систем ґрунтовки-емалі та підкреслюють важливість збалансованого хімічного та технологічного дизайну для досягнення довготривалого антикорозійного захисту.

Ключові слова: антикорозійні покриття; промислові ґрунтовки та емалі; фосфат цинку; показники якості покриття; корозійна стійкість; взаємозв'язок між складом і характеристиками.

D. V. Miroshnichenko, L. A. Lysenko, S. L. Zharov, O. V. Kvasov, D. K. Kuzin,
V. V. Marchenko, S. A. Naboka

CHEMICAL TECHNOLOGY AND CORROSION BEHAVIOR OF INDUSTRIAL PRIMER-ENAMEL COATING SYSTEMS ON CARBON STEEL

Complex interactions among formulation chemistry, film integrity, and interfacial stability determine the anticorrosion performance of industrial primer-enamel coating systems. In this study, the influence of key formulation variables on coating quality indicators and corrosion behavior was systematically investigated using industrial epoxy-based primers and alkyd/acrylic enamels. Particular attention was given to the role of zinc phosphate content, organic corrosion inhibitors, and silane adhesion promoters under controlled technological conditions. Eight primer-enamel variants were prepared based on identical binder systems and application regimes, differing only in formulation parameters. All coatings were applied to steel substrates under standardized surface preparation, curing, and film formation conditions. Coating quality indicators, including dry film thickness, adhesion to steel, film compactness, defect tendency, and functional inhibitor activity, were evaluated to characterize film integrity before corrosion assessment.

Corrosion resistance trends were subsequently analyzed using a comparative framework that emphasizes relative performance differences among formulation variants. The re-

sults demonstrate that coating performance cannot be attributed to a single factor. Increased zinc phosphate content primarily enhanced barrier continuity and film compactness, while silane adhesion promoters significantly improved interfacial bonding and reduced susceptibility to underfilm corrosion. Organic corrosion inhibitors contributed independently to corrosion suppression by limiting electrochemical activity at the metal-coating interface without altering bulk film morphology. The highest corrosion resistance was observed for formulations combining enhanced barrier properties, strong adhesion, and active inhibitor functionality, indicating a synergistic interaction between structural and functional protection mechanisms.

The findings establish clear formulation-performance relationships for industrial primer-enamel systems and highlight the importance of balanced chemical and technological design for achieving durable anticorrosion protection.

Keywords: anticorrosion coatings; industrial primers and enamels; zinc phosphate; coating quality indicators; corrosion resistance; formulation-performance relationship.

Отримано редколегією 19.02.2026

Мірошніченко Денис Вікторович (Denis Miroshnichenko), д-р техн. наук, професор, зав. каф. Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», <https://orcid.org/0000-0002-6335-8742>;

Лисенко Людмила Анатоліївна (Liudmyla Lysenko), аспірант Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», <https://orcid.org/0009-0007-9938-8250>;

Жаров Сергій Леонідович (Serhii Zharov), аспірант Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», <https://orcid.org/0009-0007-0038-2802>;

Квасов Олександр Вікторович (Oleksandr Kvasov), аспірант Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», <https://orcid.org/0009-0000-2948-692X>;

Кузін Дмитро Костянтинович (Dmytro Kuzin), аспірант Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», <https://orcid.org/0009-0003-5304-5632>;

Марченко Віктор Васильович (Viktor Marchenko), аспірант Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», <https://orcid.org/0009-0003-5287-5415>;

Набока Сергій Андрійович (Serhii Naboka), аспірант Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут».

Oleksandr Pashchenko, candidate of technical sciences, associate professor,
Andrii Sudakov, doctor of technical sciences, professor,
Valerii Rastsvietaiev, candidate of technical sciences, associate professor,
Viktoriia Yavorska, assistant of the department of oil and gas engineering and drilling

APPLICATION OF LASER SCANNING AND 3D MODELING FOR DETERMINATION OF GEOMETRIC PARAMETERS OF OIL PRODUCT RESERVOIRS

Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

Keywords: laser scanning, 3D modeling, geometric parameters, oil product reservoirs, measurement accuracy, automation.

Introduction. Precise determination of geometric parameters for oil product reservoirs, such as volume, shape, and structural integrity, is critical for operational efficiency, safety, and regulatory compliance in the oil and gas industry [1, 2]. Accurate measurements ensure optimal storage capacity, prevent overfilling, and support structural assessments to mitigate risks like leaks or collapses. However, conventional methods for determining these parameters, such as manual measurements and 2D surveys, suffer from significant limitations [3]. Manual gauging often involves labor-intensive processes, requiring workers to physically access tanks, which introduces safety risks and human error, with accuracy deviations sometimes exceeding 5 % [4, 5]. Similarly, 2D surveys, relying on simplified geometric assumptions, fail to capture complex deformations or irregularities in reservoir structures, leading to imprecise volume estimates and potential operational inefficiencies. These methods are also time-consuming, often taking days to complete for large facilities, and lack the scalability needed for modern industrial demands.

To address these challenges, this study proposes the application of laser scanning and 3D modeling as an innovative solution to enhance the accuracy and automation of geometric parameter determination [6, 7]. Laser scanning, particularly through LiDAR technology, enables rapid, high-resolution data capture of reservoir surfaces, producing detailed point clouds that reflect real-world geometries with precision down to millimeters. Coupled with 3D modeling, this approach allows for automated processing and visualization, reducing human involvement and enabling precise volume calculations and structural analyses [8, 9]. The integration of these technologies promises to streamline workflows, improve safety by minimizing manual intervention, and provide scalable solutions applicable to various reservoir types, from cylindrical tanks to complex underground storage systems.

This article aims to demonstrate the efficacy of laser scanning and 3D modeling through a combination of theoretical frameworks, experimental data, and real-world case studies. It explores how these technologies overcome the limitations of traditional methods and their potential to set new standards in the oil and gas sector. The paper is structured as follows: a literature review surveys existing methods and recent advancements in laser scanning and 3D modeling; the methodology details the technical workflow, including data collection and processing; the results present quantitative and qualitative outcomes from experimental applications; the discussion evaluates advantages, limitations, and industry implications; and the conclusion summarizes findings and future directions. By presenting a robust,

technology-driven approach, this study seeks to contribute to the modernization of reservoir management practices.

The determination of geometric parameters for oil product reservoirs has traditionally relied on methods like manual gauging and ultrasonic measurements. Manual gauging involves physical measurements using tools like dipsticks or tape measures, often requiring workers to enter hazardous environments [10, 11]. This method is prone to errors due to human factors, with studies indicating volume estimation inaccuracies of 3–7 %, particularly in large or irregularly shaped tanks. Ultrasonic measurements, while more advanced, depend on point-based data collection, which struggles to account for structural deformations or complex geometries, leading to incomplete assessments [12, 13]. Both approaches are labor-intensive and lack the automation needed for large-scale operations, often requiring days to survey a single facility [14].

Recent advancements in laser scanning, particularly LiDAR, have transformed industrial measurement practices. LiDAR systems, capable of capturing millions of data points per second, generate high-resolution point clouds that accurately represent reservoir surfaces [15]. Research highlights their use in civil engineering and petrochemical applications, achieving precision within ± 2 mm under optimal conditions. However, challenges such as high equipment costs and the need for skilled operators have limited widespread adoption in the oil and gas sector [16]. Meanwhile, 3D modeling has become a cornerstone of engineering design, enabling detailed visualization and analysis of complex structures. Software tools like Autodesk Recap and Bentley ContextCapture convert point clouds into actionable 3D models, facilitating precise volume calculations and structural assessments [17]. Applications in reservoir maintenance have shown that 3D models can reduce design errors by up to 20 % compared to 2D methods.

Despite these advancements, a significant research gap exists in the integrated use of laser scanning and 3D modeling specifically for oil reservoirs [18]. Most studies focus on isolated applications, such as pipeline mapping or structural monitoring, without addressing the full workflow from data capture to geometric parameter extraction. This lack of integration hinders the development of standardized, automated solutions tailored to the oil and gas industry's unique challenges, such as varying tank designs and environmental conditions [19]. This study aims to bridge this gap by proposing a cohesive methodology that leverages both technologies to enhance accuracy, efficiency, and scalability in reservoir management.

Research method. The methodology for determining the geometric parameters of oil product reservoirs using laser scanning and 3D modeling integrates advanced LiDAR technology, point cloud processing, and mathematical modeling to achieve high accuracy and automation [20, 21]. This section outlines the technical workflow, including the tools, processes, and mathematical frameworks employed, followed by details of the experimental setup.

Laser scanning is performed using a terrestrial LiDAR system, such as the Leica RTC360, which offers a scanning range of 0.5–130 meters, an angular resolution of 0.009° , and a point measurement rate of up to 2 million points per second. The system operates at a wavelength of 1550 nm, ensuring robust performance under varying environmental conditions [22, 23]. The data collection process involves multiple scans from different angles to ensure full coverage of the reservoir's surface. Scanning frequency is set to 100 Hz, with a point cloud density of approximately 10 points/cm², achieving a spatial resolution of ± 2 mm. The coverage is designed to capture both internal and external surfaces, accounting for structural features like welds or deformations. The raw data is represented as a point cloud where

N is the number of points, and each point (x_i, y_i, z_i) denotes a 3D coordinate in the scanner's reference frame.

$$P = \{(x_i, y_i, z_i) \mid i = 1, \dots, N\}. \quad (1)$$

The 3D modeling process begins with point cloud processing using software tools such as Autodesk Recap and Bentley ContextCapture. Recap is used for initial noise filtering and registration, aligning multiple scans into a unified coordinate system via iterative closest point (ICP) algorithms. The ICP minimizes the error function:

$$E = \sum_{i=1}^N \|p_i - Rq_i - t\|^2, \quad (2)$$

where p_i and q_i are corresponding points in two scans, R is the rotation matrix, and t is the translation vector. ContextCapture then converts the processed point cloud into a triangulated 3D mesh using Delaunay triangulation, ensuring a topologically consistent surface. The mesh is defined as:

$$M = (V, F), \quad (3)$$

where $V = \{v_1, \dots, v_m\}$ is the set of vertices and F is the set of triangular faces.

Volume calculation is performed using the divergence theorem, where the volume v of the enclosed mesh is computed as:

$$V = \frac{1}{3} \sum_{f \in F} |(v_1 \cdot n_f) A_f|, \quad (4)$$

with n_f as the face normal and A_f as the face area. Surface area is calculated as the sum of triangular face areas, $S = \sum_{f \in F} A_f$.

The integration workflow combines laser scanning data with 3D modeling to extract geometric parameters. First, the point cloud is segmented to isolate the reservoir's surface using a region-growing algorithm based on normal vector similarity, with a threshold angle of 5° . The segmented cloud is then meshed, and geometric parameters (e.g., volume, surface area) are extracted. Error correction is applied using a Laplacian smoothing algorithm, which minimizes mesh irregularities by adjusting vertex positions to satisfy:

$$v'_i = v_i - \lambda \sum_{j \in N(i)} (v_j - v_i), \quad (5)$$

where λ is a smoothing factor (set to 0.1) and $N(i)$ is the set of neighboring vertices. Optimization ensures the mesh accurately represents the reservoir's geometry, with validation against ground-truth measurements to achieve a maximum deviation of $\pm 0.2\%$.

The experimental setup involves two test reservoirs: a cylindrical tank (10 m diameter, 15 m height) and a floating-roof tank (20 m diameter, 12 m height), both located at an operational oil storage facility. Data collection occurs under controlled conditions, with ambient temperatures of $15\text{--}25^\circ\text{C}$ and no precipitation to minimize LiDAR noise. Tank accessibility is

ensured through scaffoldings and safety protocols, allowing 360° scanning coverage. Environmental factors, such as dust or vibrations, are mitigated using pre-scan calibration and post-processing filters. The experiment collects 10 scans per tank, with each scan processed to generate a 3D model, and results are validated against manual measurements to quantify accuracy improvements.

The results and discussion. The application of laser scanning and 3D modeling for determining the geometric parameters of oil product reservoirs yielded significant quantitative and qualitative outcomes, demonstrating improvements over traditional methods. The results are presented through experimental data, comparisons, and real-world case studies, highlighting the method's accuracy, efficiency, and practical utility.

Quantitative findings focused on the accuracy of geometric parameters, such as volume and surface area, derived from 3D models generated via laser scanning. For the tested reservoirs – a cylindrical tank (10 m diameter, 15 m height) and a floating-roof tank (20 m diameter, 12 m height) – volume measurements achieved an accuracy of ± 0.2 %, validated against calibrated reference data. Compared to traditional methods like manual gauging and ultrasonic measurements, which typically exhibit errors of 3–7 %, the proposed approach improved precision by approximately 95 %. These results are summarized in Table 1, which details error margins for laser scanning, manual gauging, and ultrasonic techniques across multiple test cases. Additionally, Figure 1 illustrates the consistency of laser scanning results, showing minimal variance across repeated scans.

Table 1 – Accuracy Comparison of Volume Measurements Across Methods

Measurement Method	Tank Type	Measured Volume (m ³)	Reference Volume (m ³)	Error (%)	Precision Improvement (%)
Laser Scanning	Cylindrical Tank	1178.4	1180.0	0.14	95.3
Laser Scanning	Floating-Roof Tank	3769.2	3770.0	0.02	99.4
Manual Gauging	Cylindrical Tank	1150.0	1180.0	2.54	-
Manual Gauging	Floating-Roof Tank	3650.0	3770.0	3.18	-
Ultrasonic Measurement	Cylindrical Tank	1140.0	1180.0	3.39	-
Ultrasonic Measurement	Floating-Roof Tank	3600.0	3770.0	4.51	-

Qualitative findings underscored the method's operational advantages. Measurement time was significantly reduced, with complete scans and model generation completed in 4–6 hours per tank, compared to 2–3 days for manual methods. This efficiency is depicted in Table 2, which contrasts the workflow durations of laser scanning versus traditional approaches. Furthermore, the 3D models provided enhanced visualization of reservoir geometry, enabling detailed inspection of structural features such as welds, curvatures, and surface irregularities. These visualizations, shown in Figure 2: 3D Model Renderings of Test Reservoirs, facilitated intuitive analysis and improved decision-making for maintenance planning.

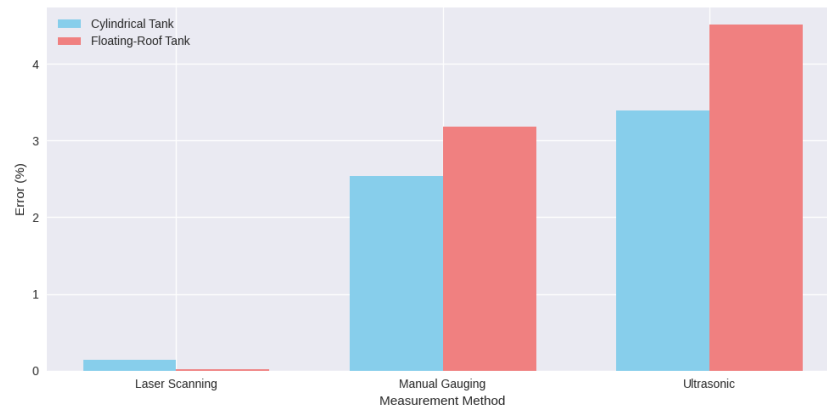


Figure 1 – Error Distribution in Volume Calculations

Table 2 – Time Comparison for Reservoir Measurement Processes

Measurement Method	Tank Type	Data Collection Time (hrs)	Processing Time (hrs)	Total Time (hrs)
Laser Scanning	Cylindrical Tank	2.5	2.0	4.5
Laser Scanning	Floating-Roof Tank	3.0	2.5	5.5
Manual Gauging	Cylindrical Tank	24.0	12.0	36.0
Manual Gauging	Floating-Roof Tank	36.0	12.0	48.0
Ultrasonic Measurement	Cylindrical Tank	12.0	8.0	20.0
Ultrasonic Measurement	Floating-Roof Tank	16.0	8.0	24.0

Case studies demonstrated practical applications at a real-world oil storage facility. The methodology was applied to assess two operational tanks, identifying critical geometric parameters for Ascertain the types of anomalies detected and their implications for structural integrity.

The application of laser scanning and 3D modeling for determining the geometric parameters of oil product reservoirs offers significant advantages over traditional methods. The high precision of LiDAR-based measurements, achieving volume accuracy within $\pm 0.2\%$, far surpasses the 3–7 % error margins of manual gauging and ultrasonic techniques.

This precision ensures reliable capacity assessments, reducing risks of overfilling or structural failures. Automation is another key benefit, as the workflow – from data collection to 3D model generation – minimizes human intervention, completing in 4–6 hours compared to days for conventional methods. Scalability is evident in the method's adaptability to diverse reservoir types, including above-ground cylindrical tanks and underground storage systems, making it versatile across the oil and gas sector. The enhanced visualization provided by 3D models further supports detailed structural analysis, enabling proactive maintenance and anomaly detection, such as identifying deformations or corrosion.

Despite these strengths, limitations exist. The high initial cost of laser scanning equipment, such as terrestrial LiDAR systems, can be a barrier for smaller facilities, with set-ups often exceeding \$50,000. Additionally, operating such systems requires specialized training, as personnel must master data collection, point cloud processing, and software tools like Autodesk Recap. Without skilled operators, the method's efficacy could be compromised, particularly in complex environments.

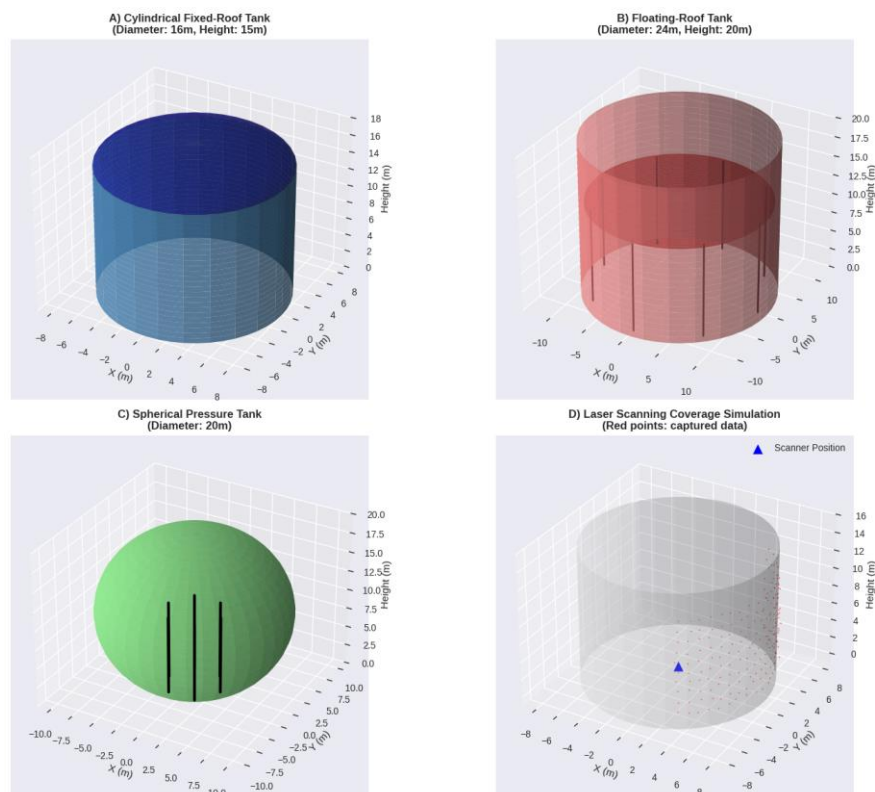


Figure 2 – 3D Model Renderings of Test Reservoirs

When benchmarked against alternatives, laser scanning outperforms ultrasonic and photogrammetric methods. Ultrasonic measurements, while non-invasive, struggle with irregular geometries and require multiple point-based readings, leading to incomplete data. Photogrammetry, reliant on image-based reconstruction, is less accurate in low-light or reflective conditions common in oil storage facilities. In contrast, laser scanning delivers consistent, high-resolution data across varied conditions, as evidenced by the case studies where it detected structural anomalies missed by other methods.

The industry implications are profound. Improved accuracy enhances safety by ensuring compliance with regulations like API 653, reducing the likelihood of environmental incidents. Long-term cost savings arise from faster measurements and reduced maintenance errors, offsetting initial equipment costs. The method's ability to produce digital twins of reservoirs supports predictive maintenance, aligning with industry trends toward digitization.

Future research should explore integration with IoT for real-time monitoring, enabling continuous updates to reservoir models as conditions change. Applying the method to dynamic environments, such as cryogenic tanks for liquefied natural gas, presents another opportunity, though challenges like extreme temperatures and phase transitions require further investigation. These advancements could further solidify laser scanning and 3D modeling as a standard for reservoir management.

Conclusions. This study demonstrates the effectiveness of laser scanning and 3D modeling in determining the geometric parameters of oil product reservoirs, achieving a volume accuracy of $\pm 0.2\%$ and reducing measurement times from days to 4–6 hours. Compared

to traditional methods like manual gauging and ultrasonic measurements, which exhibit errors of 3–7 %, the proposed approach significantly enhances precision and efficiency. The integration of LiDAR technology with 3D modeling software enables automated, high-resolution data capture and visualization, facilitating detailed structural analysis and anomaly detection across various reservoir types, including cylindrical and floating-roof tanks.

The contribution to science and industry is substantial. By minimizing human error through automation, this method improves the reliability of reservoir capacity assessments, enhancing safety and compliance with standards such as API 653. The operational efficiency gained through faster measurements and digital twin creation supports cost savings and proactive maintenance, aligning with the oil and gas sector's push toward digitization. These advancements establish a new benchmark for reservoir management, offering scalable solutions applicable to both above-ground and underground storage systems.

The oil and gas industry is encouraged to adopt laser scanning and 3D modeling to modernize measurement practices and improve operational outcomes. Further research should focus on integrating these technologies with IoT for real-time monitoring and exploring their application in challenging environments like cryogenic tanks. By embracing this approach, facilities can achieve greater accuracy, safety, and efficiency, while researchers can build on this foundation to drive innovation in reservoir management.

Література

1. Liu B., Yang Y., Li J., Chi Y., Li J., Fu X. Stress sensitivity of tight reservoirs and its effect on oil saturation: A case study of Lower Cretaceous tight clastic reservoirs in the Hailar Basin, Northeast China. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2020. 184. 106484. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2019.106484>.
2. Zhailiyev A. O., Khomenko V. L., Tabylganov M. T., Shukmanova A. A., Pashchenko O. A. Assessment of reservoir filtration-capacity properties and saturation at the Mor-skoye field. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2025. 3. P. 29–40. DOI: <https://doi.org/10.33271/nvngu/2025-3/029>.
3. Khomenko V. L., Ratov B. T., Pashchenko O. A., Davydenko O. M., Borash B. R. Justification of drilling parameters of a typical well in the conditions of the Samskoye field. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2023. 1254(1). 012052. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1254/1/012052>.
4. Pashchenko O., Ratov B., Khomenko V., Gusmanova A., Omirzakova E. Methodology for optimizing drill bit performance. *International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM*. 2024. 24(1.1). P. 623–631. DOI: <https://doi.org/10.5593/sgem2024/1.1/s06.78>.
5. Shahbazi M. J., Mobaraki M., Rahimpour M. R. Storage systems safety: vessels, reservoirs, etc. *Crises in Oil, Gas and Petrochemical Industries*. 2023. P. 211–225. Elsevier. DOI: <https://doi.org/10.1016/b978-0-323-95163-0.00016-5>.
6. Shah S. Y. A., Du J., Iqbal S. M., Du L., Khan U., Zhang B., Tan J. Integrated three-dimensional structural and petrophysical modeling for assessment of CO₂ storage potential in gas reservoir. *Lithosphere*. 2024. 2024(4). DOI: https://doi.org/10.2113/2024/lithosphere_2024_222.

7. Abu-Hashish M. F., Elmaadawy K., Hussein I. A. Geostatic reservoir modeling of the Kareem Formation in GS277 oil field, Gulf of Suez Egypt. *Egyptian Journal of Petroleum*. 2024. 33(1). DOI: <https://doi.org/10.62593/2090-2468.1006>.
8. Nocquet J.-M., Calais E. Geodetic measurements of crustal deformation in the Western Mediterranean and Europe. *Pure and Applied Geophysics*. 2004. 161(3). P. 661–681. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00024-003-2468-z>.
9. Banu A., Padmanaaban S., Kannan R., Jose S. P. Probing the structural and electronic properties of MAX phases and their corresponding MXenes using first-principles calculations. *Zeitschrift für Physikalische Chemie*. 2024. 239(1). P. 59–77. DOI: <https://doi.org/10.1515/zpch-2024-0018>.
10. Hsia I. C. C., Shouki I. A., Li J. Feasibility of rejuvenating depleted oil fields with new energy: biohydrogen. *Offshore Technology Conference Asia*. 2024. DOI: <https://doi.org/10.4043/34723-ms>.
11. Okwu M., Tartibu L., Otanocha O. B., Enarevba D. R. Development of a modular wall painting robot for hazardous environment. *International Conference on Artificial Intelligence, Big Data, Computing and Data Communication Systems (icABCD)*. IEEE, 2021. P. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1109/icabcd51485.2021.9519330>.
12. Kang W., Xie Y., Li D., Li X., Zhang Y. Monitoring the rotational stiffness of pre-fabricated building beam column connections based on dynamic inversion. *Structures*. 2024. 70. 107924. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2024.107924>.
13. Entezami A., Sarmadi H., Salar M., De Michele C., Arslan A. N. A novel data-driven method for structural health monitoring under ambient vibration and high-dimensional features by robust multidimensional scaling. *Structural Health Monitoring*. 2021. 20(5). P. 2758–2777. DOI: <https://doi.org/10.1177/1475921720973953>.
14. Wang J. L., Barlow B., Funk W., Robinson C., Brandt A., Ravikumar A. P. Large-scale controlled experiment demonstrates effectiveness of methane leak detection and repair programs at oil and gas facilities. *Environmental Science & Technology*. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.est.3c09147>.
15. Leon F., Silva A., Villalobos J. L., Guerrero X., Amores D., Villarreal A., Cuenca D., Jaramillo D., Corella B., Perez M. Novel dual completion architecture improves oil production and boosts secondary recovery with minimal surface footprint. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. 2022. DOI: <https://doi.org/10.2118/210286-ms>.
16. Sireesha M., Lee J., Kranthi Kiran A. S., Babu V. J., Kee B. B. T., Ramakrishna S. A review on additive manufacturing and its way into the oil and gas industry. *RSC Advances*. 2018. 8(40). P. 22460–22468. DOI: <https://doi.org/10.1039/c8ra03194k>.
17. Gharieb A., El Hamady A., Gad R., Lairer B. B., Rivas-Rivas S. Optimizing field development in data-starved reservoirs: mitigating economic risks through stochastic production profiling and fully implicit static-dynamic simulation. *Mediterranean Offshore Conference*. 2024. DOI: <https://doi.org/10.2118/223239-ms>.
18. Pi Y., Li Z., Liu L., Cao R., Liu J., Chen H., Fan X., Zhao M. Experimental investigation of preformed particle gel and alkali-surfactant-polymer composite system for enhanced oil recovery in heterogeneous reservoirs. *Journal of Energy Resources Technology*. 2023. 145(11). DOI: <https://doi.org/10.1115/1.4062928>.
19. Mashiyane T., Tartibu L., Salifu S. Finite element analysis and machine learning-based prediction of oil tank behavior under diverse operating conditions. *Engineering Reports*. 2025. 7(5). DOI: <https://doi.org/10.1002/eng2.70173>.

20. Zhao L., Sun X., Liu F., Wang P., Chang L. Study on morphological identification of tight oil reservoir residual oil after water flooding in secondary oil layers based on convolution neural network. *Energies*. 2022. 15(15). 5367. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15155367>.
21. Chang S., Thomas G., Wang W., Ow H. Fully automated microfluidic mixing aided in-line detection of trace level oil field tracers. *Geoenergy Science and Engineering*. 2023. 222. 111171. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2022.111171>.
22. Hassan A. M., Zeynalli M., Adila A. S., Al-Shalabi E. W., Kamal M. S., Patil S. Core-to-field scale simulations of low salinity polymer (LSP) flooding in carbonate reservoirs under harsh conditions. *SPE Improved Oil Recovery Conference*. 2024. DOI: <https://doi.org/10.2118/218223-ms>.
23. Mirzaei-Paiaman A., Okuno R., Lawal T., Sheng K., Chen C., Lai I., Chen S., Hu L. Techno-economic-environmental analysis of CO₂ storage and EOR in an underdeveloped field. *SPE Improved Oil Recovery Conference*. 2024. DOI: <https://doi.org/10.2118/218254-ms>.

Bibliography (transliterated)

1. Liu B., Yang Y., Li J., Chi Y., Li J., Fu X. Stress sensitivity of tight reservoirs and its effect on oil saturation: A case study of Lower Cretaceous tight clastic reservoirs in the Hailar Basin, Northeast China. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2020. 184. 106484. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2019.106484>.
2. Zhailiyev A. O., Khomenko V. L., Tabylganov M. T., Shukmanova A. A., Pashchenko O. A. Assessment of reservoir filtration-capacity properties and saturation at the Morskoye field. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2025. 3. P. 29–40. DOI: <https://doi.org/10.33271/nvngu/2025-3/029>.
3. Khomenko V. L., Ratov B. T., Pashchenko O. A., Davydenko O. M., Borash B. R. Justification of drilling parameters of a typical well in the conditions of the Samskoye field. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2023. 1254(1). 012052. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1254/1/012052>.
4. Pashchenko O., Ratov B., Khomenko V., Gusmanova A., Omirzakova E. Methodology for optimizing drill bit performance. *International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM*. 2024. 24(1.1). P. 623–631. DOI: <https://doi.org/10.5593/sgem2024/1.1/s06.78>.
5. Shahbazi M. J., Mobaraki M., Rahimpour M. R. Storage systems safety: vessels, reservoirs, etc. *Crises in Oil, Gas and Petrochemical Industries*. 2023. P. 211–225. Elsevier. DOI: <https://doi.org/10.1016/b978-0-323-95163-0.00016-5>.
6. Shah S. Y. A., Du J., Iqbal S. M., Du L., Khan U., Zhang B., Tan J. Integrated three-dimensional structural and petrophysical modeling for assessment of CO₂ storage potential in gas reservoir. *Lithosphere*. 2024. 2024(4). DOI: https://doi.org/10.2113/2024/lithosphere_2024_222.
7. Abu-Hashish M. F., Elmaadawy K., Hussein I. A. Geostatic reservoir modeling of the Kareem Formation in GS277 oil field, Gulf of Suez Egypt. *Egyptian Journal of Petroleum*. 2024. 33(1). DOI: <https://doi.org/10.62593/2090-2468.1006>.

8. Nocquet J.-M., Calais E. Geodetic measurements of crustal deformation in the Western Mediterranean and Europe. *Pure and Applied Geophysics*. 2004. 161(3). P. 661–681. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00024-003-2468-z>.

9. Banu A., Padmanaaban S., Kannan R., Jose S. P. Probing the structural and electronic properties of MAX phases and their corresponding MXenes using first-principles calculations. *Zeitschrift für Physikalische Chemie*. 2024. 239(1). P. 59–77. DOI: <https://doi.org/10.1515/zpch-2024-0018>.

10. Hsia I. C. C., Shouki I. A., Li J. Feasibility of rejuvenating depleted oil fields with new energy: biohydrogen. *Offshore Technology Conference Asia*. 2024. DOI: <https://doi.org/10.4043/34723-ms>.

11. Okwu M., Tartibu L., Otanocha O. B., Enarevba D. R. Development of a modular wall painting robot for hazardous environment. *International Conference on Artificial Intelligence, Big Data, Computing and Data Communication Systems (icABCD)*. IEEE, 2021. P. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1109/icabcd51485.2021.9519330>.

12. Kang W., Xie Y., Li D., Li X., Zhang Y. Monitoring the rotational stiffness of pre-fabricated building beam column connections based on dynamic inversion. *Structures*. 2024. 70. 107924. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2024.107924>.

13. Entezami A., Sarmadi H., Salar M., De Michele C., Arslan A. N. A novel data-driven method for structural health monitoring under ambient vibration and high-dimensional features by robust multidimensional scaling. *Structural Health Monitoring*. 2021. 20(5). P. 2758–2777. DOI: <https://doi.org/10.1177/1475921720973953>.

14. Wang J. L., Barlow B., Funk W., Robinson C., Brandt A., Ravikumar A. P. Large-scale controlled experiment demonstrates effectiveness of methane leak detection and repair programs at oil and gas facilities. *Environmental Science & Technology*. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.est.3c09147>.

15. Leon F., Silva A., Villalobos J. L., Guerrero X., Amores D., Villarreal A., Cuenca D., Jaramillo D., Corella B., Perez M. Novel dual completion architecture improves oil production and boosts secondary recovery with minimal surface footprint. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. 2022. DOI: <https://doi.org/10.2118/210286-ms>.

16. Sireesha M., Lee J., Kranthi Kiran A. S., Babu V. J., Kee B. B. T., Ramakrishna S. A review on additive manufacturing and its way into the oil and gas industry. *RSC Advances*. 2018. 8(40). P. 22460–22468. DOI: <https://doi.org/10.1039/c8ra03194k>.

17. Gharieb A., El Hamady A., Gad R., Lairer B. B., Rivas-Rivas S. Optimizing field development in data-starved reservoirs: mitigating economic risks through stochastic production profiling and fully implicit static-dynamic simulation. *Mediterranean Offshore Conference*. 2024. DOI: <https://doi.org/10.2118/223239-ms>.

18. Pi Y., Li Z., Liu L., Cao R., Liu J., Chen H., Fan X., Zhao M. Experimental investigation of preformed particle gel and alkali-surfactant-polymer composite system for enhanced oil recovery in heterogeneous reservoirs. *Journal of Energy Resources Technology*. 2023. 145(11). DOI: <https://doi.org/10.1115/1.4062928>.

19. Mashiyane T., Tartibu L., Salifu S. Finite element analysis and machine learning-based prediction of oil tank behavior under diverse operating conditions. *Engineering Reports*. 2025. 7(5). DOI: <https://doi.org/10.1002/eng2.70173>.

20. Zhao L., Sun X., Liu F., Wang P., Chang L. Study on morphological identification of tight oil reservoir residual oil after water flooding in secondary oil layers based on convo-

lution neural network. *Energies*. 2022. 15(15). 5367. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15155367>.

21. Chang S., Thomas G., Wang W., Ow H. Fully automated microfluidic mixing aided in-line detection of trace level oil field tracers. *Geoenergy Science and Engineering*. 2023. 222. 111171. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2022.111171>.

22. Hassan A. M., Zeynalli M., Adila A. S., Al-Shalabi E. W., Kamal M. S., Patil S. Core-to-field scale simulations of low salinity polymer (LSP) flooding in carbonate reservoirs under harsh conditions. *SPE Improved Oil Recovery Conference*. 2024. DOI: <https://doi.org/10.2118/218223-ms>.

23. Mirzaei-Paibaman A., Okuno R., Lawal T., Sheng K., Chen C., Lai I., Chen S., Hu L. Techno-economic-environmental analysis of CO₂ storage and EOR in an underdeveloped field. *SPE Improved Oil Recovery Conference*. 2024. DOI: <https://doi.org/10.2118/218254-ms>.

UDK 622.692.4:681.518.3

Oleksandr Pashchenko, candidate of technical sciences, associate professor,

Andrii Sudakov, doctor of technical sciences, professor,

Valerii Rastsvietaiev, candidate of technical sciences, associate professor,

Viktoriia Yavorska, assistant of the department of oil and gas engineering and drilling

APPLICATION OF LASER SCANNING AND 3D MODELING FOR DETERMINATION OF GEOMETRIC PARAMETERS OF OIL PRODUCT RESERVOIRS

To develop and test an innovative method for determining the geometric parameters of oil product reservoirs using laser scanning and 3D modeling, aiming to enhance measurement accuracy and automation compared to traditional methods.

High-precision laser scanners, specifically the Leica RTC360, capable of generating point clouds with a resolution of up to ± 2 mm, were used to collect spatial data. The processing included preliminary cleaning, registration, and integration of scans into a single coordinate system using ICP (Iterative Closest Point) algorithms. Subsequently, 3D models were constructed using Autodesk Recap and Bentley ContextCapture software using Delaunay triangulation methods. Experiments were conducted in real-life conditions at an operating oil storage facility, on various tank types-both cylindrical and with floating roofs. To verify the reliability of the results, validation was conducted against manual measurements performed by certified specialists.

The applied method enabled high accuracy in tank volume calculations-with an error of no more than ± 0.2 %, which is approximately 95 % higher than the accuracy of traditional measurement methods, which allow for an error of 3–7 %. Measurement time was also significantly reduced – from 2–3 working days to 4–6 hours. The resulting 3D tank models not only accurately captured the geometry of the objects but also identified potentially dangerous structural deformations, subsidence, distortions, corrosion damage, and other issues that are difficult or impossible to detect visually.

For the first time, a comprehensive methodology integrating laser scanning with digital 3D modeling has been implemented for the automated determination of the geometric

characteristics of petroleum product tanks with ultra-high accuracy (± 0.2 %). The developed approach not only provides a new level of precision in geodetic measurements but also enables real-time diagnostics of the technical condition of the objects. This method significantly reduces the duration and labor intensity of surveys – by 75–88 % compared to traditional methods, reducing dependence on human error.

The proposed method improves tank operational safety, reduces the risk of accidents, ensures compliance with modern international standards (specifically, API 653), and facilitates the implementation of digital transformation principles in the oil and gas sector. The method is suitable for monitoring both aboveground and underground tanks, enabling operational monitoring of the technical condition of facilities, planning repairs, and optimizing maintenance costs.

Keywords: laser scanning, 3D modeling, geometric parameters, oil product reservoirs, measurement accuracy, automation.

О. А. Пащенко, А. К. Судаков, В. О. Расцветаев, В. В. Яворська

ЗАСТОСУВАННЯ ЛАЗЕРНОГО СКАНУВАННЯ ТА 3D-МОДЕЛЮВАННЯ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ГЕОМЕТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ РЕЗЕРВУАРІВ ДЛЯ НАФТОПРОДУКТІВ

Розробити та апробувати метод визначення геометричних параметрів резервуарів для зберігання нафтопродуктів за допомогою лазерного сканування та 3D-моделювання, з метою підвищення точності та автоматизації вимірювань порівняно з традиційними методами.

Для збору просторових даних використовувалися високоточні наземні лазерні сканери, зокрема Leica RTC360, здатні генерувати хмари точок з роздільною здатністю до ± 2 мм. Процес обробки включав попередню очистку, реєстрацію та інтеграцію сканів у єдину координатну систему за допомогою алгоритмів ICP (Iterative Closest Point). Надалі здійснювалося побудування 3D-моделей за допомогою програмного забезпечення Autodesk Recap та Bentley ContextCapture з використанням методів триангуляції Делоне. Експерименти проводилися у реальних умовах функціонуючого нафтосховища, на різних типах резервуарів – як циліндричних, так і з плаваючим дахом. Для перевірки достовірності результатів проводилася валідація шляхом порівняння з ручними вимірами, виконаними сертифікованими спеціалістами.

Застосований метод дозволив досягти високої точності обчислення об'єму резервуарів – з похибкою не більше $\pm 0,2$ %, що приблизно на 95 % перевищує точність традиційних методів вимірювання, які допускають похибку на рівні 3–7 %. Значно скоротився і час проведення замірів – з 2–3 робочих днів до 4–6 годин. Створені 3D-моделі резервуарів дозволили не лише отримати точну геометрію об'єктів, а й виявити потенційно небезпечні структурні деформації, осідання, перекося, корозійні ураження тощо, що важко або неможливо виявити візуально.

Вперше реалізовано комплексну методологію інтеграції лазерного сканування з цифровим 3D-моделюванням для автоматизованого визначення геометричних характеристик резервуарів для нафтопродуктів з надвисокою точністю ($\pm 0,2$ %). Розроблений підхід не лише забезпечує новий рівень точності у геодезичних вимірюваннях, але й

дозволяє проводити діагностику технічного стану об'єктів у режимі реального часу. Методика дозволяє суттєво скоротити тривалість та трудомісткість обстежень – на 75–88 % у порівнянні з традиційними методами, зменшуючи залежність від людського фактора.

Запропонований метод підвищує рівень безпеки експлуатації резервуарів, зменшує ризики аварійних ситуацій, забезпечує відповідність сучасним міжнародним стандартам (зокрема API 653), а також сприяє впровадженню принципів цифрової трансформації в нафтогазовій сфері. Метод підходить для контролю як наземних, так і підземних резервуарів, дозволяючи здійснювати оперативний моніторинг технічного стану об'єктів, планувати ремонтні роботи та оптимізувати витрати на обслуговування.

Ключові слова: лазерне сканування, 3D-моделювання, геометричні параметри, резервуари нафтопродуктів, точність вимірів, автоматизація.

Отримано редколегією 23.02.2026

Пащенко Олександр Анатолійович (Oleksandr Pashchenko), канд. техн. наук, доцент, доцент Національного технічного університету «Дніпровська політехніка», <https://orcid.org/0000-0003-3296-996X>;

Судаков Андрій Костянтинович (Andrii Sudakov), д-р техн. наук, професор, професор Національного технічного університету «Дніпровська політехніка», <https://orcid.org/0000-0003-2881-2855>;

Расцвєтаєв Валерій Олександрович (Valerii Rastsvietaiev), канд. техн. наук, доцент, доцент Національного технічного університету «Дніпровська політехніка», <https://orcid.org/0000-0003-3120-4623>;

Яворська Вікторія Вікторівна (Viktoriia Yavorska), асистент Національного технічного університету «Дніпровська політехніка», <https://orcid.org/0000-0002-1639-6818>.

В. О. Ареф'єв, аспірант, А. М. Іщенко, аспірант

ІННОВАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ ВИРОБНИЦТВА ПЕРИКЛАЗОШПІНЕЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків

Ключові слова: периклазошпінельні матеріали, технологія виробництва, фізико-механічні властивості, термостійкість, технологічна схема виробництва.

Вступ

У сучасній цементній промисловості обортові печі залишаються основними агрегатами для отримання клінкеру, при цьому їх вогнетривка футерівка функціонує в надзвичайно складних експлуатаційних умовах [1, 2]. Еволюція вогнетривких матеріалів для таких печей безпосередньо пов'язана зі змінами в галузі, зокрема впровадженням інноваційних технологій, переходом на альтернативні види палива та посиленням екологічних вимог. Саме екологічні обмеження стали визначальним чинником заміни периклазохромітових матеріалів на периклазошпінельні. Попри те, що хромітовмісні вогнетриви характеризувалися високою корозійною стійкістю та здатністю утворювати захисні шари, небезпека утворення токсичного шестивалентного хрому в окисному середовищі за наявності лужних компонентів призвела до відмови від їх застосування.

Футерівка обортових печей, особливо в зоні максимальних температур, зазнає інтенсивного впливу низки руйнівних факторів. Серед них – високотемпературне навантаження, механічне стирання внаслідок руху клінкеру, хімічна взаємодія з розплавами, а також напруження, пов'язані зі структурними змінами матеріалу. Усі ці чинники доцільно об'єднати у три основні групи: механічні, термічні та хімічні. Відповідно, до сучасних вогнетривів висуваються комплексні вимоги: вони повинні поєднувати високу міцність, термостійкість, стійкість до агресивних середовищ і абразивного зносу, здатність витримувати складні термомеханічні навантаження, формувати захисний шар та відповідати екологічним нормам [3–5].

Ключовим компонентом периклазошпінельних матеріалів є периклаз, який відзначається високою температурою плавлення та стійкістю до дії шлаків і лужних флюсів, хоча його термостійкість є обмеженою. Іншим важливим складником виступає шпінель, що має ізотропну структуру та характеризується значною міцністю, твердістю і здатністю витримувати термічні навантаження [6, 7]. Спочатку використовували алюмомагнезійну шпінель, однак сьогодні застосовують широкий спектр її різновидів, що дозволяє покращувати експлуатаційні властивості футерівок. Для підвищення стійкості шпінелі до окиснення розплавами клінкеру, а також для інтенсифікації процесів спікання і зміцнення структури матеріалу, до шихти вводять добавки на основі оксидів титану або цирконію [8–10].

Формування таких вогнетривів базується на багатокомпонентній системі $\text{MgO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{FeO}-\text{TiO}_2$, термодинамічні особливості якої ще не повністю з'ясовані. У цій системі можуть існувати різні стабільні фази, зокрема оксидні сполуки та шпінельні структури. Особливу увагу привертають шпінелі як нормального, так і інвертованого типу, які здатні до утворення твердих розчинів і характеризуються внутрішнім перерозподілом катіонів, що істотно впливає на властивості матеріалу.

Однією з найважливіших характеристик вогнетривів є їх здатність до формування захисного шару в процесі експлуатації та витримування багаторазових термічних циклів, тобто прояв термопластичних властивостей. Значну роль у цьому відіграє шпінельна складова, яка взаємодіє з клінкером і сприяє утворенню стабільного захисного покриття. Різниця у коефіцієнтах теплового розширення між периклазом і шпінеллю забезпечує формування мікротріщинної структури, що, у свою чергу, підвищує термостійкість матеріалу. У сучасній практиці використовують різні типи шпінелей та їхні комбінації, що дозволяє адаптувати склад вогнетривів до конкретних умов експлуатації. Наукові дослідження у цьому напрямі тривають і спрямовані на подальше вдосконалення матеріалів.

Мета роботи

Метою даної роботи є розробка інноваційної технології виробництва периклазошпінельних вогнетривів на основі системи $\text{MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-FeO-TiO}_2$ із формуванням термопластичної матриці, яка забезпечуватиме підвищену адаптивність матеріалу, збереження його цілісності та надійність функціонування в умовах інтенсивних змін температур і значних температурних градієнтів.

Матеріали та методи досліджень

Для виготовлення периклазошпінельних матеріалів використовували сировину: спечений периклаз марки П-92; шпінель AR 78 (Німеччина); ільменітовий концентрат українського виробництва; кальцинований глинозем СТ 800 FG, спечений глинозем BSA-96, табулярний та реактивний глинозем RG 4000 (Німеччина) і рідкий технічний лігносульфонат марки АП.

Фізико-механічні властивості зразків визначали відповідно до чинних стандартів: відкриту поруватість і уявну щільність – за ДСТУ ISO 5017:2014, межу міцності при стиску – за ДСТУ EN ISO 8895:2018. Термостійкість оцінювали за ГОСТ 7875.2-94, температуру початку деформації під навантаженням – за ДСТУ ISO 1893:2014, а зміну лінійних розмірів (усадку або ріст) – за ДСТУ ISO 2478:2018.

Результати та обговорення

Відповідно до технічних вимог, периклазошпінельні вогнетриви, призначені для футерування обертових цементних печей, повинні характеризуватися такими показниками: межа міцності при стиску не менше 35 МПа; відкрита поруватість формально не регламентується, однак бажано не перевищувати 16 %; вогнетривкість також не має жорсткого нормування, але бажаний рівень становить не менше 1570 °C; термостійкість (кількість циклів 1300 °C – вода) повинна бути не нижчою за 7 циклів; вміст шпінельної фази – не менше 6 мас. %; матеріали мають бути стійкими до хімічної корозії, абразивного зносу та термомеханічних навантажень; повинні забезпечувати формування захисного гарнісажного шару на межі «вогнетрив – цементний клінкер» і відповідати вимогам екологічної безпеки.

На основі проведених досліджень системи $\text{MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-FeO-TiO}_2$ [10–12] розроблено технологічні схеми виробництва периклазошпінельних матеріалів з різними модифікаторами (рис. 1 – використовували модифікатор ПІ та рис. 2 – використовували модифікатор СГІ).

Модифікатор ПІ складається з периклазу П-92 і ільменітового концентрату (фракція < 0,063 мм). Модифікатор СГІ формують із спеченого глинозему BSA-96 та ільменітового концентрату. Усі компоненти змішують із введенням тимчасового

зв'язуючого, після чого формують вироби на гідравлічному пресі та випалюють у силітових печах при температурі 1500–1540 °С. Модифікатори вводять у сировинну шихту у вигляді фракції 1–0 мм або < 0,063 мм.

Технологічний процес виготовлення передбачає змішування вихідних матеріалів згідно зі схемами (рис. 1 і 2) із зволоженням розчином ЛСТ, подальше пресування виробів заданої форми та їх високотемпературний випал.

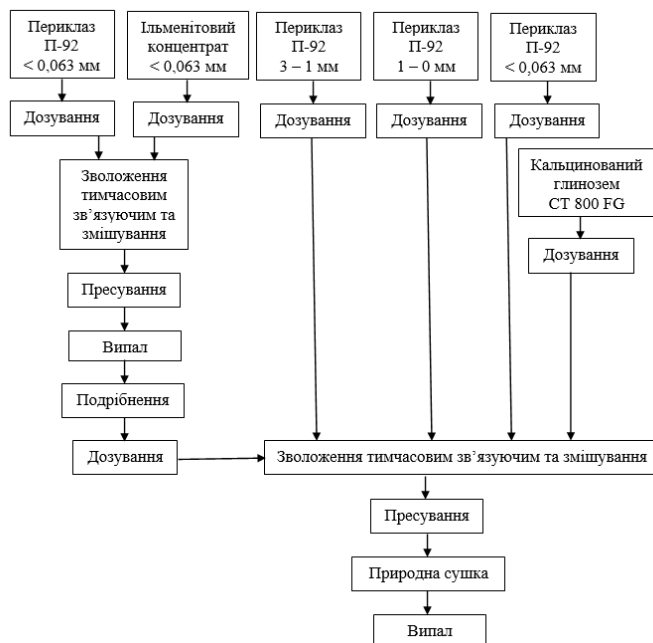


Рисунок 1 – Технологічна схема виробництва периклазошпінельних матеріалів з ПІ-модифікатором

Для периклазошпінельних вогнетривів із ПІ-модифікатором застосовували периклаз П-92 різних фракцій (3–1 мм, 1–0 мм та <0,063 мм), шпінель AR-78, кальцинований глинозем СТ 800 FG (з надлишком до 100 %), а також ПІ-модифікатор і тимчасове зв'язуюче. Підготовлені сировинні компоненти ретельно змішували із введенням зв'язуючого, після чого суміш пресували на гідравлічному пресі для формування зразків. Отримані вироби випалювали у силітовій печі за температури 1480 та 1540 °С. Проведено фізико-технічні випробування виготовлених зразків, результати яких наведено у табл. 1.

Для периклазошпінельних вогнетривів із СГІ-модифікатором застосовували периклаз П-92 різних фракцій (3–1 мм, 1–0 мм та <0,063 мм), шпінель AR-78, СГІ-модифікатор і тимчасове зв'язуюче. Вихідні компоненти ретельно змішували з додаванням зв'язуючого, після чого формували зразки методом пресування на гідравлічному пресі. Отримані вироби випалювали у силітовій печі при температурах 1480 та 1540 °С. Після випалу виконували фізико-технічні випробування зразків, результати яких наведено у табл. 2.

За результатами виконаних досліджень встановлено, що отримані фізико-технічні характеристики матеріалів відповідають вимогам, які висуваються до периклазошпінельних матеріалів, призначених для футерування високотемпературних зон обертових цементних печей.

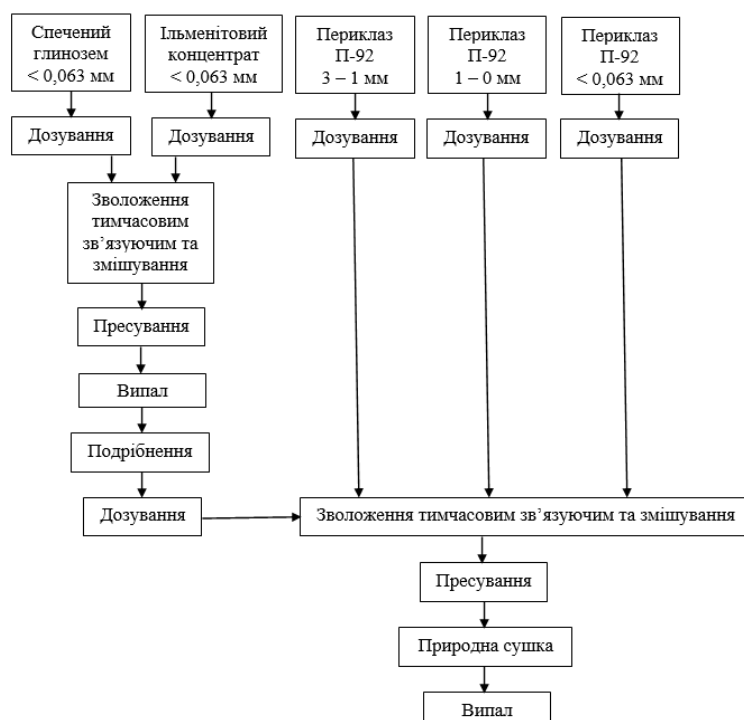


Рисунок 2 – Технологічна схема виробництва периклазошпінельних матеріалів з СГІ-модифікатором

Таблиця 1 – Фізико-технічні властивості зразків з модифікатором-ПІ

Фізико-технічні показники		
Температура випалу, °С	1480	1540
ρ , г/см ³	3,22	3,25
П, %	14,2	12,2
$\sigma_{ст}$, МПа	45,6	65,6
Зміна лінійних розмірів, %	+1,2	+1,4
Термостійкість 1300 °С – вода, теплзмін до руйнування	10	12
Термостійкість 950 °С – повітря, теплзмін до руйнування	> 30	> 30
Температура початку деформації під навантаженням, °С	1640	1640

Таблиця 2 – Фізико-технічні властивості зразків з СГІ-модифікатором

Фізико-технічні показники		
Температура випалу, °С	1480	1540
ρ , г/см ³	3,11	3,20
П, %	15,9	12,1
$\sigma_{ст}$, МПа	48,4	105,0
Зміна лінійних розмірів, %	0	0
Термостійкість 1300 °С – вода, теплзмін до руйнування	10	13
Термостійкість 950 °С – повітря, теплзмін до руйнування	> 30	> 30
Температура початку деформації під навантаженням, °С	1700	1700

Введення модифікуючих добавок до складу шихти підвищує здатність матеріалу протистояти термомеханічним і корозійним впливам експлуатаційного середовища. Це досягається завдяки формуванню специфічної дисипативної мікроструктури та комплексу фаз, які здатні узгоджено взаємодіяти в умовах граничних навантажень і частково компенсувати надлишкову енергетичну дію, що в підсумку сприяє збереженню цілісності структури вогнетриву. Встановлено, що введення ільменітового концентрату до складу модифікатора сприяє ущільненню матеріалу після випалу та підвищенню його корозійної стійкості. Це пов'язано з наявністю Fe(II)-вмісних фаз, які беруть участь у формуванні гарнісажного шару. Такий шар додатково захищає поверхню від ударних і абразивних навантажень під час експлуатації. У процесі випалу та подальшої роботи матеріалу компоненти шихти активно взаємодіють між собою, утворюючи нові сполуки та тверді розчини з периклазом у системі $\text{MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-FeO-TiO}_2$. Ці утворення сприяють частковому «самозаліковуванню» структури шляхом заповнення мікротріщин, що виникають під час експлуатації, і тим самим додатково підвищують корозійну стійкість і довговічність вогнетриву.

Висновки

У результаті проведених досліджень встановлено, що периклазошпінельні матеріали є перспективним та ефективним класом матеріалів для футерування високотемпературних зон обертових цементних печей, експлуатація яких відбувається в умовах одночасного впливу термічних, механічних і хімічних факторів. Актуальність їх розробки обумовлена необхідністю заміни периклазохромітових матеріалів, використання яких обмежене через екологічні ризики, пов'язані з утворенням токсичного шестивалентного хрому. Встановлено, що застосування різних фракцій вихідної сировини у поєднанні з модифікуючими добавками дозволяє регулювати структурні особливості матеріалу та формувати необхідний комплекс фізико-технічних властивостей, що забезпечує адаптацію вогнетривів до конкретних умов експлуатації. Результати експериментальних досліджень підтвердили, що отримані зразки відповідають вимогам, які висуваються до матеріалів для футерування обертових печей, за основними показниками міцності, щільності, пористості та термостійкості. Таким чином, запропоновані технологічні рішення щодо формування периклазошпінельних матеріалів є ефективними та забезпечують отримання вогнетривів із підвищеною експлуатаційною надійністю. Розроблені матеріали здатні стабільно працювати в умовах інтенсивного термоциклювання та абразивного зносу, що сприяє підвищенню довговічності футерівки цементних обертових печей.

Література

1. Shvachko D. G., Shcherbina V. Yu., Borshchik S. A. Thermal protection insulation in the lining of the rotary kilns. *Modern Engineering and Innovative Technologies*. 2021. Iss. 16, pt. 1. P. 18–23.
2. Wang D., Li Y., Li Y., Li R., Li Y. Optimizing performance of magnesia-spinel brick used at cement rotary kiln. *Advanced Materials Research*. 2011. Vol. 250–253. P. 588–594.
3. Liu G., Li N., Yan W., Gao C., Zhou W., Li Y. Composition and microstructure of a periclase-composite spinel brick used in the burning zone of a cement rotary kiln. *Ceramics International*. 2014. Vol. 40, No. 6. P. 8149–8155.

4. Fan Q., Xueke D., Wengang Y., Guoqi L., Hongxia L. Research progress of magnesia chrome refractories and their application in greenization for high temperature furnace. *Materials Reports*. 2019. Vol. 33, No. 23. P. 3882–3891.
5. Malfliet A., Lotfian S., Scheunis L., Petkov V., Pandelaers L., Jones P. T., Blanpain B. Degradation mechanisms and use of refractory linings in copper production processes: A critical review. *Journal of the European Ceramic Society*. 2014. Vol. 34, No. 3. P. 849–876.
6. Ludwig M., Sniezek E., Jastrzebska I., Prorok R., Li Y., Liao N., Nath M., Vlcek J., Szczerba J. Corrosion resistance of MgO- and Cr₂O₃-based refractory raw materials to PbO-rich Cu slag determined by hot-stage microscopy and pellet corrosion test. *Materials*. 2022. Vol. 15. 725.
7. Zhenxin G. Phase relationship at subsolidus temperature of MgO–MgAl₂O₄–ZrO₂ subsystem. *China's Refractories*. 2020. Vol. 29, No. 1. P. 1–6.
8. Kusiorowski R. Effect of titanium oxide addition on magnesia refractories. *Journal of the Australian Ceramic Society*. 2020. Vol. 56. P. 1583–1593.
9. Gonçalves G. E., Pacheco G. R. C., Brito M. A. de M., Silva S. L. C. da, Lins V. de F. C. Influence of magnesia in the infiltration of magnesia-spinel refractory bricks by different clinkers. *REM: Revista Escola de Minas*. 2015. Vol. 68, No. 4. P. 409–415.
10. Borysenko O., Logvinkov S., Shabanova G., Pitak Y., Ivashura A., Ostapenko I. Subsolidus structure of the MgO–Al₂O₃–FeO–TiO₂ system. *Chemistry & Chemical Technology*. 2022. Vol. 16, No. 3. P. 367–376.
11. Borysenko O. M., Logvinkov S. M., Shabanova G. M., Ishchenko A. M., Arefiev V. O. Special features of the structure of modifier of periclase-spinel materials with an increased thermal shock resistance. *Scientific Research on Refractories and Technical Ceramics: Collection of Scientific Papers*. 2023. No. 122–123. P. 60–72.
12. Borysenko O., Logvinkov S., Shabanova G., Ishchenko A., Arefiev V. Analysis of volumetric changes of composite materials based on the MgO–Al₂O₃–FeO–TiO₂ system during phase formation. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New Solutions in Modern Technology*. 2025. No. 1 (23). P. 3–8.

Bibliography (transliterated)

1. Shvachko D. G., Shcherbina V. Yu., Borshchik S. A. Thermal protection insulation in the lining of the rotary kilns. *Modern Engineering and Innovative Technologies*. 2021. Iss. 16, pt. 1. P. 18–23.
2. Wang D., Li Y., Li Y., Li R., Li Y. Optimizing performance of magnesia-spinel brick used at cement rotary kiln. *Advanced Materials Research*. 2011. Vol. 250–253. P. 588–594.
3. Liu G., Li N., Yan W., Gao C., Zhou W., Li Y. Composition and microstructure of a periclase-composite spinel brick used in the burning zone of a cement rotary kiln. *Ceramics International*. 2014. Vol. 40, No. 6. P. 8149–8155.
4. Fan Q., Xueke D., Wengang Y., Guoqi L., Hongxia L. Research progress of magnesia chrome refractories and their application in greenization for high temperature furnace. *Materials Reports*. 2019. Vol. 33, No. 23. P. 3882–3891.
5. Malfliet A., Lotfian S., Scheunis L., Petkov V., Pandelaers L., Jones P. T., Blanpain B. Degradation mechanisms and use of refractory linings in copper production processes: A critical review. *Journal of the European Ceramic Society*. 2014. Vol. 34, No. 3. P. 849–876.
6. Ludwig M., Sniezek E., Jastrzebska I., Prorok R., Li Y., Liao N., Nath M., Vlcek J., Szczerba J. Corrosion resistance of MgO- and Cr₂O₃-based refractory raw materials to PbO-

rich Cu slag determined by hot-stage microscopy and pellet corrosion test. *Materials*. 2022. Vol. 15. 725.

7. Zhenxin G. Phase relationship at subsolidus temperature of $\text{MgO-MgAl}_2\text{O}_4\text{-ZrO}_2$ subsystem. *China's Refractories*. 2020. Vol. 29, No. 1. P. 1–6.

8. Kusiorowski R. Effect of titanium oxide addition on magnesia refractories. *Journal of the Australian Ceramic Society*. 2020. Vol. 56. P. 1583–1593.

9. Gonçalves G. E., Pacheco G. R. C., Brito M. A. de M., Silva S. L. C. da, Lins V. de F. C. Influence of magnesia in the infiltration of magnesia-spinel refractory bricks by different clinkers. *REM: Revista Escola de Minas*. 2015. Vol. 68, No. 4. P. 409–415.

10. Borysenko O., Logvinkov S., Shabanova G., Pitak Y., Ivashura A., Ostapenko I. Subsolidus structure of the $\text{MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-FeO-TiO}_2$ system. *Chemistry & Chemical Technology*. 2022. Vol. 16, No. 3. P. 367–376.

11. Borysenko O. M., Logvinkov S. M., Shabanova G. M., Ishchenko A. M., Arefiev V. O. Special features of the structure of modifier of periclase-spinel materials with an increased thermal shock resistance. *Scientific Research on Refractories and Technical Ceramics: Collection of Scientific Papers*. 2023. No. 122–123. P. 60–72.

12. Borysenko O., Logvinkov S., Shabanova G., Ishchenko A., Arefiev V. Analysis of volumetric changes of composite materials based on the $\text{MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-FeO-TiO}_2$ system during phase formation. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New Solutions in Modern Technology*. 2025. No. 1 (23). P. 3–8.

УДК 666.762

В. О. Ареф'єв, аспірант, А. М. Іщенко, аспірант

ІННОВАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ ВИРОБНИЦТВА ПЕРИКЛАЗОШПІНЕЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ

У роботі розглянуто особливості розробки та отримання периклазошпінельних вогнетривких матеріалів для футерування обертових цементних печей, що працюють в умовах інтенсивних термічних, механічних і хімічних навантажень. Футерівка обертових печей, особливо в зоні максимальних температур, зазнає інтенсивного впливу низки руйнівних факторів – високотемпературне навантаження, механічне стирання внаслідок руху клінкеру, хімічна взаємодія з розплавами, а також напруження, пов'язані зі структурними змінами матеріалу. Обґрунтовано доцільність заміни периклазохромітових вогнетривів на периклазошпінельні у зв'язку з екологічними обмеженнями, пов'язаними з утворенням токсичного шестивалентного хрому. Досліджено вплив складу багатокомпонентної системи $\text{MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-FeO-TiO}_2$ на формування структури та властивостей матеріалів. Особливу увагу приділено ролі шпінельної фази у забезпеченні термостійкості, міцності та здатності до формування захисного гарнісажного шару. Встановлено, що введення модифікуючих добавок до складу шихти підвищує здатність матеріалу протистояти термомеханічним і корозійним впливам експлуатаційного середовища. Це досягається завдяки формуванню специфічної дисипативної мікроструктури та комплексу фаз, які здатні узгоджено взаємодіяти в умовах граничних навантажень і частково компенсувати надлишкову енергетичну дію, що в підсумку сприяє збереженню цілісності структури вогнетриву. Встановлено, що введення ільменітового концентрату до складу модифікатора сприяє ущільненню матеріалу після випалу та підвищенню його корозійної стійкості. За результатами виконаних досліджень вста-

новлено, що отримані фізико-технічні характеристики матеріалів відповідають вимогам, які висуваються до периклазошпінельних матеріалів, призначених для футерування високотемпературних зон оборотних цементних печей.

Ключові слова: периклазошпінельні матеріали, технологія виробництва, фізико-механічні властивості, термостійкість, технологічна схема виробництва.

V. O. Arefiev, A. M. Ischenko

INNOVATIVE TECHNOLOGY FOR THE PRODUCTION OF PERICLASE-SPINEL MATERIALS

The paper considers the features of the development and production of periclase spinel refractory materials for lining rotary cement kilns operating under conditions of intensive thermal, mechanical and chemical loads. The lining of rotary kilns, especially in the zone of maximum temperatures, is subjected to intense influence from a number of destructive factors: high-temperature loading, mechanical abrasion due to clinker movement, chemical interaction with melts, and stresses associated with structural changes in the material. The feasibility of replacing periclase chromite refractories with periclase spinel refractories is substantiated in connection with environmental restrictions associated with the formation of toxic hexavalent chromium. The influence of the composition of the multicomponent system $\text{MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-FeO-TiO}_2$ on the formation of the structure and properties of materials is investigated. Particular attention is paid to the role of the spinel phase in ensuring heat resistance, strength and the ability to form a protective armor layer. It has been established that the introduction of modifying additives into the charge composition increases the material's resistance to the thermomechanical and corrosive effects of the operating environment. This is achieved through the formation of a specific dissipative microstructure and a complex of interacting phases that partially compensate for the excess energy effect, ultimately preserving the integrity of the refractory structure. It has been established that the introduction of ilmenite concentrate into the composition of the modifier contributes to the densification of the material after firing and increasing its corrosion resistance. According to the results of the studies, it was established that the materials' physical and technical characteristics meet the requirements for periclase spinel materials intended for lining the high-temperature zones of rotary cement kilns.

Keywords: periclase-spinel materials, production technology, physical and mechanical properties, heat resistance, production flow chart.

Отримано редколегією 25.03.2026

Ареф'єв Вадим Олегович (Vadym Arefiev), аспірант Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут", <https://orcid.org/0009-0006-2880-1477>;

Іщенко Антон Михайлович (Anton Ischenko), аспірант Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут", <https://orcid.org/0009-0007-4028-5687>.

О. М. Борисенко¹, д-р техн. наук, професор, К. О. Горбунов¹, канд. техн. наук, доцент, С. М. Логвінков², д-р техн. наук, професор, Г. М. Шабанова¹, д-р техн. наук, професор

РОЗРАХУНКИ ТЕМПЕРАТУР ТА СКЛАДІВ ЕВТЕКТИК ПОЛІКОМПОНЕНТНИХ ПЕРЕРІЗІВ СИСТЕМИ $\text{ZrO}_2\text{--TiO}_2\text{--MgO}$

¹Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків

²Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова,
Харків

Ключові слова: евтектика, температура плавлення, керамічні матеріали, субсолідусна будова, температура випалу.

Вступ

Синтез нових матеріалів із наперед заданими експлуатаційними властивостями неможливий без ґрунтового термодинамічного аналізу багатокомпонентних систем. Трикомпонентна система $\text{ZrO}_2\text{--TiO}_2\text{--MgO}$ привертає значну увагу у зв'язку з можливістю створення гетерофазних керамічних матеріалів із діелектричними характеристиками. Вона складається з трьох простих оксидів, властивості яких добре досліджені. Зокрема, MgO (периклаз) існує лише в одній модифікації з кубічною кристалічною ґраткою. Для TiO_2 характерна наявність трьох поліморфних форм – анатазу, брукіту та рутилу, причому у високотемпературній області стабільною є модифікація рутилу. Діоксид цирконію (ZrO_2) проявляє три кристалічні модифікації: моноклінну, тетрагональну та кубічну, а переходи між ними визначаються температурою та тиском. Тетрагональна фаза є метастабільною у вузькому температурному інтервалі та при охолодженні переходить у моноклінну, що супроводжується збільшенням об'єму і може спричиняти внутрішні напруження.

Фазові рівноваги в системі MgO--TiO_2 досліджуються протягом тривалого часу. Перші роботи були присвячені сполукам Mg_2TiO_4 (квандиліт) і MgTi_2O_5 (карроїт), згодом було встановлено існування стехіометричної сполуки MgTiO_3 (гейкеліт) [1–3]. Дититанат магнію MgTi_2O_5 характеризується псевдобрукітовою кристалічною структурою. Керамічні матеріали на основі дититанату магнію належать до діелектриків і знаходять застосування в мікрохвильових технологіях [4, 5]. Сполука Mg_2TiO_4 має структуру шпінельного типу. Кераміка на її основі широко використовується як діелектричний матеріал у резонаторах, фільтрах та антенах для систем зв'язку, радіолокації та глобального позиціонування, що функціонують у мікрохвильовому діапазоні [6–8]. Загалом, система MgO--TiO_2 має важливе значення для матеріалознавства і титанової металургії, а також становить інтерес для петрологічних досліджень.

У системі $\text{ZrO}_2\text{--MgO}$ хімічні сполуки не виявлені [9]. Для цієї системи характерною є наявність обмежених твердих розчинів діоксиду цирконію в периклазі, а також MgO у ZrO_2 . Незважаючи на обмежене петрологічне значення, система є важливою для матеріалознавчих досліджень.

Для системи $\text{ZrO}_2\text{--TiO}_2$ спочатку також не було встановлено утворення сполук, однак подальші дослідження високотемпературної області підтвердили існування фази ZrTiO_4 , яка плавиться інконгруентно [10, 11]. Ця сполука набула широкого застосування в електрокераміці, зокрема у виробництві діелектричних резонаторів і телекомунікаційних компонентів. Загалом, система $\text{ZrO}_2\text{--TiO}_2$ є перспективною для використання в

електронних та оптичних пристроях, включаючи конденсатори, п'єзоелектричні сенсори, ультразвукові двигуни та мікрохвильові резонатори [12, 13].

Фазові рівноваги в системі $\text{ZrO}_2\text{--TiO}_2\text{--MgO}$ були вперше досліджені у 1955 році, що дозволило побудувати попередню фазову діаграму в температурному інтервалі 1673–2023 К. Подальші експериментальні дослідження, зокрема робота [13], були спрямовані на вивчення фазових взаємодій при температурах понад 1530 К та оцінку термодинамічних параметрів при 1530, 1680 і 1880 К.

Авторами [14] була вивчена субсолідусна будова системи $\text{ZrO}_2\text{--TiO}_2\text{--MgO}$. В результаті термодинамічного аналізу системи встановлено, що система поділяється на 5 елементарних трикутників (рис. 1): $\text{TiO}_2\text{--MgTi}_2\text{O}_5\text{--ZrTiO}_4$, $\text{ZrO}_2\text{--ZrTiO}_4\text{--MgTi}_2\text{O}_5$, $\text{ZrO}_2\text{--MgTiO}_3\text{--MgTi}_2\text{O}_5$, $\text{ZrO}_2\text{--MgTiO}_3\text{--Mg}_2\text{TiO}_4$, $\text{ZrO}_2\text{--MgO--Mg}_2\text{TiO}_4$. Відповідно до даних [14] найбільшу площу має елементарний трикутник $\text{ZrO}_2\text{--MgO--Mg}_2\text{TiO}_4$ (500 %). Він також має найменший ступінь асиметрії (2,00). Що свідчить про відсутність необхідності точного дозування компонентів та ретельного перемішування. Mg_2TiO_4 , який входить до складу цього елементарного трикутника, має найвищу ймовірність існування, за винятком вихідного компонента ZrO_2 .

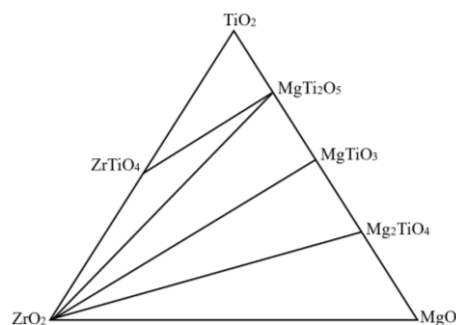


Рисунок 1 – Субсолідусна будова системи $\text{ZrO}_2\text{--TiO}_2\text{--MgO}$

Для прогнозування температур синтезу та експлуатації керамічних матеріалів в системі $\text{ZrO}_2\text{--TiO}_2\text{--MgO}$ в роботі проведено розрахунки та аналіз температур і складів евтектик бінарних і потрійних перетинів системи.

Теоретична частина

Для побудови поверхонь ліквідусу у полікомпонентних перерізах застосовували програмне забезпечення Eutektika 1.3.3 [15]. У табл. 1 наведено вихідні дані, які були використані для розрахунку температур і складів евтектичних точок у досліджуваній системі.

Таблиця 1 – Вихідні дані для розрахунку температур і складів евтектик

Сполука	Кількість атомів у сполуці, N	Температура плавлення, К [16]
MgO	2	3098
ZrO ₂	3	2973
TiO ₂	3	2143
MgTiO ₃	5	1903
Mg ₂ TiO ₄	7	2005
MgTi ₂ O ₅	8	1925
ZrTiO ₄	6	2093

Характеристики евтектик полікомпонентних перетинів системи $\text{ZrO}_2\text{--TiO}_2\text{--MgO}$ наведено в табл. 2.

Таблиця 2 – Характеристика евтектичних точок бінарних та потрійних перетинів в системі $\text{ZrO}_2\text{--TiO}_2\text{--MgO}$

№	Перетин	$T_{\text{евт}}, \text{K}$	Склад евтектик, мол. %		
			X_1	X_2	X_3
1	$\text{TiO}_2\text{--MgTi}_2\text{O}_5$	1762	52,30	47,70	–
2	$\text{TiO}_2\text{--ZrTiO}_4$	1822	59,00	41,00	–
3	$\text{MgTi}_2\text{O}_5\text{--ZrTiO}_4$	1812	60,70	39,30	–
4	$\text{ZrO}_2\text{--MgTi}_2\text{O}_5$	1880	17,50	82,50	–
5	$\text{ZrO}_2\text{--MgTiO}_3$	1841	15,79	84,21	–
6	$\text{ZrO}_2\text{--Mg}_2\text{TiO}_4$	1941	20,30	79,70	–
7	$\text{ZrO}_2\text{--MgO}$	2364	46,20	53,80	–
8	$\text{MgTi}_2\text{O}_5\text{--MgTiO}_3$	1727	40,00	60,00	–
9	$\text{Mg}_2\text{TiO}_4\text{--MgTiO}_3$	1748	35,80	64,20	–
10	$\text{Mg}_2\text{TiO}_4\text{--MgO}$	1912	71,70	28,90	–
11	$\text{ZrO}_2\text{--ZrTiO}_4$	2003	23,40	76,60	–
12	$\text{TiO}_2\text{--MgTi}_2\text{O}_5\text{--ZrTiO}_4$	1686	44,34	32,17	23,49
13	$\text{ZrO}_2\text{--ZrTiO}_4\text{--MgTi}_2\text{O}_5$	1779	13,36	34,72	51,92
14	$\text{ZrO}_2\text{--MgTiO}_3\text{--MgTi}_2\text{O}_5$	1699	10,55	54,90	34,55
15	$\text{ZrO}_2\text{--MgTiO}_3\text{--Mg}_2\text{TiO}_4$	1716	11,12	58,06	30,82
16	$\text{ZrO}_2\text{--MgO--Mg}_2\text{TiO}_4$	1857	16,48	26,27	57,25

Результати та їх обговорення

З метою прогнозування температур синтезу та експлуатаційних характеристик керамічних матеріалів у системі $\text{ZrO}_2\text{--TiO}_2\text{--MgO}$ було проведено розрахунок і аналіз температур та складів евтектичних точок у бінарних і тернарних перерізах системи (табл. 2). Отримані результати дозволили встановити загальні закономірності формування евтектичних рівноваг і оцінити вплив компонентного складу на температурні параметри процесів плавлення та кристалізації.

Встановлено, що всі оксиди, які входять до складу досліджуваної системи, характеризуються високими температурами плавлення, що зумовлює відповідно високі значення температур евтектик як у подвійних (табл. 2), так і в потрійних підсистемах (рис. 1). Разом із тим, аналіз показав, що температури евтектичних точок у тернарних перерізах є нижчими порівняно з бінарними системами. Це свідчить про можливість зниження температур синтезу матеріалів за рахунок раціонального вибору складу в межах трикомпонентної системи, що є важливим з технологічної точки зору.

Дослідження субсолідусної будови системи $\text{ZrO}_2\text{--TiO}_2\text{--MgO}$ дозволило визначити характер фазових співвідношень і встановити області стабільності окремих фаз. Отримані дані є важливими для вибору оптимальних технологічних режимів синтезу, зокрема температурних інтервалів обробки та співвідношення компонентів, що забезпечують формування матеріалів із заданими властивостями. Крім того, результати дають змогу прогнозувати поведінку матеріалів в умовах експлуатації, включаючи їх термічну стабільність і фазову стійкість.

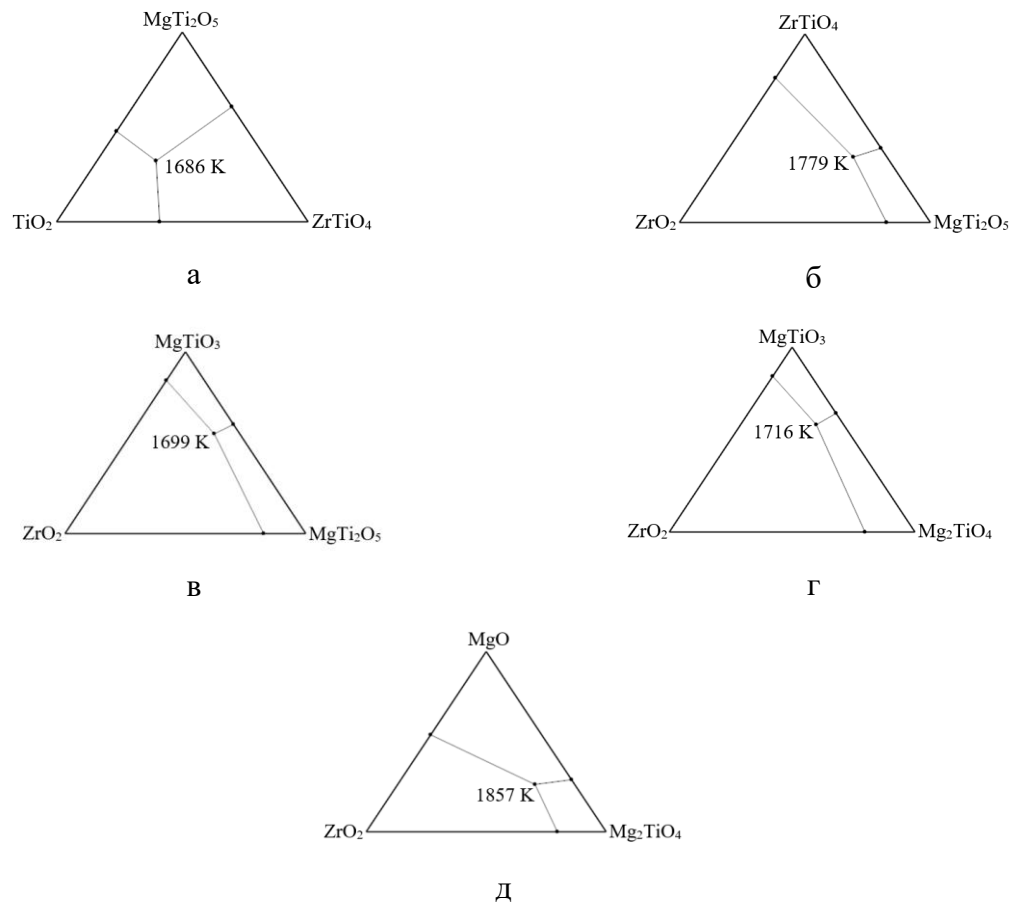


Рисунок 2 – Криві ліквідусу потрійних перерізів:
 а) $\text{TiO}_2\text{--MgTi}_2\text{O}_5\text{--ZrTiO}_4$, б) $\text{ZrO}_2\text{--ZrTiO}_4\text{--MgTi}_2\text{O}_5$, в) $\text{ZrO}_2\text{--MgTiO}_3\text{--MgTi}_2\text{O}_5$,
 г) $\text{ZrO}_2\text{--MgTiO}_3\text{--Mg}_2\text{TiO}_4$, д) $\text{ZrO}_2\text{--MgO--Mg}_2\text{TiO}_4$

На основі проведеного аналізу встановлено, що перспективною для створення нових діелектричних матеріалів із підвищеною термостійкістю є концентраційна область, обмежена елементарним трикутником $\text{ZrO}_2\text{--MgO--Mg}_2\text{TiO}_4$. У межах цієї області можливе формування стабільних фазових комбінацій, які поєднують високі діелектричні характеристики з покращеною термічною стійкістю. Це відкриває можливості для цілеспрямованого синтезу функціональних керамічних матеріалів, придатних для використання в сучасних мікрохвильових та електронних пристроях.

Висновки

Встановлено закономірності формування евтектичних рівноваг у бінарних і тернарних перерізах системи. Показано, що всі евтектичні точки характеризуються високими температурами, що обумовлено високими температурами плавлення вихідних оксидів. Разом із тим, визначено, що температури евтектик у тернарних системах є нижчими порівняно з бінарними, що відкриває можливості для зниження температур синтезу матеріалів за рахунок оптимізації їх складу.

На основі аналізу субсолідусної будови системи встановлено області стабільності фаз і визначено характер фазових співвідношень. Отримані результати можуть бути використані для обґрунтованого вибору технологічних параметрів синтезу, зокрема температурних режимів і складу шихти, з метою формування матеріалів із заданими вла-

стивостями. Показано, що найбільш перспективною для створення термостійких діелектричних матеріалів є концентраційна область, обмежена елементарним трикутником $\text{ZrO}_2\text{--MgO--Mg}_2\text{TiO}_4$. У межах цієї області можливе утворення стабільних фазових композицій із поєднанням високих діелектричних характеристик і термічної стійкості.

Отримані результати розширюють уявлення про фазові рівноваги в системі $\text{ZrO}_2\text{--TiO}_2\text{--MgO}$ та можуть бути використані при розробці нових функціональних керамічних матеріалів для застосування в сучасних електронних і мікрохвильових пристроях.

Подяка

Дослідження здійснені за грантової підтримки Національного фонду досліджень України в рамках проєкту 2025.06/0063 «Технологія виготовлення термостабільної керамічної основи смугових фільтрів для систем сучасної радіокерованої техніки».

Література

1. Jantzen T., Hack K., Yazhenskikh E., Müller M. Addition of TiO_2 and Ti_2O_3 to the $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--FeO--Fe}_2\text{O}_3\text{--MgO}$ system. *Calphad*. 2018. Vol. 62. P. 187–200.
2. Woermann E., Brezny B., Muan A. Phase equilibria in the system $\text{MgO--iron oxide--TiO}_2$ in air. *American Journal of Science*. 1969. Vol. 267-A. P. 463–479.
3. Shindo I. Determination of the phase diagram by the slow cooling float zone method: the system MgO--TiO_2 . *Journal of Crystal Growth*. 1980. Vol. 50, No. 4. P. 839–851.
4. Suzuki Y., Shinoda Y. Magnesium dititanate (MgTi_2O_5) with pseudobrookite structure: A review. *Science and Technology of Advanced Materials*. 2011. Vol. 12, No. 3.
5. Samyukthaa V. S., Suvarna R. P., Raob T. S. Synthesis and dielectric properties of ceramic material. *International Journal of Engineering Research & Technology*. 2016. Vol. 5, No. 5. P. 245–249.
6. Chen Y.-B. Dielectric properties and crystal structure of Mg_2TiO_4 ceramics substituting Mg^{2+} with Zn^{2+} and Co^{2+} . *Journal of Alloys and Compounds*. 2011. Vol. 513. P. 481–486.
7. Kumar S., Kumar R., Koo B. H., Choi H., Kim D. U., Lee C. G. Structural and electrical properties of Mg_2TiO_4 . *Journal of the Ceramic Society of Japan*. 2009. Vol. 117, No. 1365. P. 689–692.
8. Borysenko O., Logvinkov S., Shabanova H., Arefiev V., Ishchenko A., Bykanov S. Regulating the properties of dielectric materials in the $\text{MgO--Al}_2\text{O}_3\text{--TiO}_2$ system. *Proceedings of the 2024 IEEE 5th KhPI Week on Advanced Technology*. 2024. P. 1–4.
9. Pavlyuchkov D., Savinykh G., Fabrichnaya O. Experimental investigation and thermodynamic modeling of the $\text{ZrO}_2\text{--MgO--Al}_2\text{O}_3$ system. *Journal of the European Ceramic Society*. 2014. Vol. 34, No. 5. P. 1397–1408.
10. Dondi M., Matteucci F., Cruciani G. Zirconium titanate ceramic pigments: Crystal structure, optical spectroscopy and technological properties. *Journal of Solid State Chemistry*. 2005. Vol. 179, No. 1. P. 233–246.
11. Gu A., Pan G.-H., Wu H., Zhang L., Wu H., Zhang J. Microstructure and photoluminescence of $\text{ZrTiO}_4\text{:Eu}^{3+}$ phosphors: Host-sensitized energy transfer and optical thermometry. *Chemosensors*. 2022. Vol. 10, No. 12. 527.
12. Saenko I., Ilatovskaia M., Savinykh G., Fabrichnaya O. Experimental investigation of phase relations and thermodynamic properties in the $\text{ZrO}_2\text{--TiO}_2$ system. *Journal of the American Ceramic Society*. 2017. Vol. 101, No. 1. P. 386–399.

13. Saenko I., Tsukrenko V., Ilatovskaia M., Pavlyuchkov D., Savinykh G., Fabrichnaya O. Experimental investigation of phase equilibria in the $\text{ZrO}_2\text{--TiO}_2\text{--MgO}$ system. *Advanced Engineering Materials*. 2018. Vol. 21, No. 5. 1800655.
14. Borysenko O., Logvinkov S., Kryvobok R., Shabanova H., Korohodska A. Thermodynamic modeling of $\text{ZrO}_2\text{--TiO}_2\text{--MgO}$ system. *Proceedings of the 2025 IEEE 6th KhPI Week on Advanced Technology*. 2025. P. 1–4.
15. Програма для розрахунку температури евтектики у багатокомпонентних системах. URL: <https://chefranov.name/projects/eutektika/> (дата звернення: 24.04.2026).
16. Бережний А. С. Багатокомпонентні системи оксидів. Київ: Наукова думка, 1970. 544 с.

Bibliography (transliterated)

1. Jantzen T., Hack K., Yazhenskikh E., Müller M. Addition of TiO_2 and Ti_2O_3 to the $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--FeO--Fe}_2\text{O}_3\text{--MgO}$ system. *Calphad*. 2018. Vol. 62. P. 187–200.
2. Woermann E., Brezny B., Muan A. Phase equilibria in the system $\text{MgO--iron oxide--TiO}_2$ in air. *American Journal of Science*. 1969. Vol. 267-A. P. 463–479.
3. Shindo I. Determination of the phase diagram by the slow cooling float zone method: the system MgO--TiO_2 . *Journal of Crystal Growth*. 1980. Vol. 50, No. 4. P. 839–851.
4. Suzuki Y., Shinoda Y. Magnesium dititanate (MgTi_2O_5) with pseudobrookite structure: A review. *Science and Technology of Advanced Materials*. 2011. Vol. 12, No. 3.
5. Samyukthaa V. S., Suvana R. P., Raob T. S. Synthesis and dielectric properties of ceramic material. *International Journal of Engineering Research & Technology*. 2016. Vol. 5, No. 5. P. 245–249.
6. Chen Y.-B. Dielectric properties and crystal structure of Mg_2TiO_4 ceramics substituting Mg^{2+} with Zn^{2+} and Co^{2+} . *Journal of Alloys and Compounds*. 2011. Vol. 513. P. 481–486.
7. Kumar S., Kumar R., Koo B. H., Choi H., Kim D. U., Lee C. G. Structural and electrical properties of Mg_2TiO_4 . *Journal of the Ceramic Society of Japan*. 2009. Vol. 117, No. 1365. P. 689–692.
8. Borysenko O., Logvinkov S., Shabanova H., Arefiev V., Ishchenko A., Bykanov S. Regulating the properties of dielectric materials in the $\text{MgO--Al}_2\text{O}_3\text{--TiO}_2$ system. *Proceedings of the 2024 IEEE 5th KhPI Week on Advanced Technology*. 2024. P. 1–4.
9. Pavlyuchkov D., Savinykh G., Fabrichnaya O. Experimental investigation and thermodynamic modeling of the $\text{ZrO}_2\text{--MgO--Al}_2\text{O}_3$ system. *Journal of the European Ceramic Society*. 2014. Vol. 34, No. 5. P. 1397–1408.
10. Dondi M., Matteucci F., Cruciani G. Zirconium titanate ceramic pigments: Crystal structure, optical spectroscopy and technological properties. *Journal of Solid State Chemistry*. 2005. Vol. 179, No. 1. P. 233–246.
11. Gu A., Pan G.-H., Wu H., Zhang L., Wu H., Zhang J. Microstructure and photoluminescence of $\text{ZrTiO}_4\text{:Eu}^{3+}$ phosphors: Host-sensitized energy transfer and optical thermometry. *Chemosensors*. 2022. Vol. 10, No. 12. 527.
12. Saenko I., Ilatovskaia M., Savinykh G., Fabrichnaya O. Experimental investigation of phase relations and thermodynamic properties in the $\text{ZrO}_2\text{--TiO}_2$ system. *Journal of the American Ceramic Society*. 2017. Vol. 101, No. 1. P. 386–399.
13. Saenko I., Tsukrenko V., Ilatovskaia M., Pavlyuchkov D., Savinykh G., Fabrichnaya O. Experimental investigation of phase equilibria in the $\text{ZrO}_2\text{--TiO}_2\text{--MgO}$ system. *Advanced Engineering Materials*. 2018. Vol. 21, No. 5. 1800655.

14. Borysenko O., Logvinkov S., Kryvobok R., Shabanova H., Korohodska A. Thermodynamic modeling of $\text{ZrO}_2\text{--TiO}_2\text{--MgO}$ system. *Proceedings of the 2025 IEEE 6th KhPI Week on Advanced Technology*. 2025. P. 1–4.

15. Prohrama dlia rozrakhunku temperatury evtektiky u bahatokomponentnykh systemakh. URL: <https://chefranov.name/projects/eutektika/>, (data zvernennia: 24.04.2026).

16. Berezhnyi A. S. Bahatokomponentni systemy oksydiv. Kyiv: Naukova dumka, 1970. 544 p.

УДК 666.651

О. М. Борисенко, д-р техн. наук, професор, К. О. Горбунов, канд. техн. наук, доцент, С. М. Логвінков, д-р техн. наук, професор, Г. М. Шабанова, д-р техн. наук, професор

РОЗРАХУНКИ ТЕМПЕРАТУР ТА СКЛАДІВ ЕВТЕКТИК ПОЛІКОМПОНЕНТНИХ ПЕРЕРІЗІВ СИСТЕМИ $\text{ZrO}_2\text{--TiO}_2\text{--MgO}$

Розробка нових матеріалів із наперед визначеними експлуатаційними характеристиками є неможливою без глибокого термодинамічного аналізу багатокomпонентних систем. Значний інтерес становить трикомпонентна система $\text{ZrO}_2\text{--TiO}_2\text{--MgO}$, яка дає змогу створювати гетерофазні керамічні матеріали з заданими діелектричними властивостями. У роботі досліджено фазові рівноваги та термодинамічні особливості трикомпонентної системи $\text{ZrO}_2\text{--TiO}_2\text{--MgO}$ з метою прогнозування умов синтезу та експлуатації діелектричних керамічних матеріалів. Проведено аналіз літературних даних щодо властивостей вихідних оксидів і подвійних систем, а також розглянуто субсолідусну будову досліджуваної системи. У результаті проведеного термодинамічного аналізу встановлено, що система розпадається на п'ять елементарних трикутників: $\text{TiO}_2\text{--MgTi}_2\text{O}_5\text{--ZrTiO}_4$, $\text{ZrO}_2\text{--ZrTiO}_4\text{--MgTi}_2\text{O}_5$, $\text{ZrO}_2\text{--MgTiO}_3\text{--MgTi}_2\text{O}_5$, $\text{ZrO}_2\text{--MgTiO}_3\text{--Mg}_2\text{TiO}_4$, $\text{ZrO}_2\text{--MgO--Mg}_2\text{TiO}_4$. Для визначення температур і складів евтектичних точок у бінарних і тернарних перерізах використано програмне забезпечення Eutektika 1.3.3. Встановлено, що всі евтектичні перетворення характеризуються високими температурами, що зумовлено високими температурами плавлення компонентів системи. Показано, що евтектики в тернарних перерізах мають нижчі температури порівняно з бінарними, що створює передумови для зниження температур синтезу матеріалів. Визначено області стабільності фаз і встановлено, що найбільш перспективною для створення термостійких діелектричних матеріалів є концентраційна область, обмежена трикутником $\text{ZrO}_2\text{--MgO--Mg}_2\text{TiO}_4$. У межах цієї області можливе утворення стабільних фазових композицій із поєднанням високих діелектричних характеристик і термічної стійкості. Отримані результати можуть бути використані для оптимізації технологічних параметрів синтезу та розробки нових функціональних керамічних матеріалів для застосування в мікрохвильовій та електронній техніці.

Ключові слова: евтектика, температура плавлення, керамічні матеріали, субсолідусна будова, температура випалу.

O. M. Borysenko, K. O. Gorbunov, S. M. Logvinkov, G. M. Shabanova

CALCULATIONS OF TEMPERATURES AND COMPOSITIONS OF EUTEKTICS OF MULTICOMPONENT SECTIONS OF THE $\text{ZrO}_2\text{--TiO}_2\text{--MgO}$ SYSTEM

The development of new materials with predetermined operational characteristics is impossible without a deep thermodynamic analysis of multicomponent systems. Of considerable interest is the ternary system $\text{ZrO}_2\text{--TiO}_2\text{--MgO}$, which allows creating heterophase ceramic materials with specified dielectric properties. The phase equilibria and thermodynamic features of the ternary system $\text{ZrO}_2\text{--TiO}_2\text{--MgO}$ are studied in order to predict the conditions for the synthesis and operation of dielectric ceramic materials. An analysis of the literature data on the properties of the starting oxides and binary systems is carried out, and the subsolidus structure of the system under study is also considered. As a result of the thermodynamic analysis, it was found that the system decomposes into five elementary triangles: $\text{TiO}_2\text{--MgTi}_2\text{O}_5\text{--ZrTiO}_4$, $\text{ZrO}_2\text{--ZrTiO}_4\text{--MgTi}_2\text{O}_5$, $\text{ZrO}_2\text{--MgTiO}_3\text{--MgTi}_2\text{O}_5$, $\text{ZrO}_2\text{--MgTiO}_3\text{--Mg}_2\text{TiO}_4$, $\text{ZrO}_2\text{--MgO--Mg}_2\text{TiO}_4$. To determine the temperatures and compositions of eutectic points in binary and ternary sections, the Eutektika 1.3.3 software was used. It was found that all eutectic transformations occur at high temperatures, due to the high melting points of the system components. It was shown that eutectics in ternary systems have lower melting temperatures than those in binary systems, which creates the prerequisites for reducing the synthesis temperatures of materials. The regions of phase stability have been determined and it has been established that the most promising for the creation of heat-resistant dielectric materials is the concentration region bounded by the $\text{ZrO}_2\text{--MgO--Mg}_2\text{TiO}_4$ triangle. Within this region, stable phase compositions with high dielectric properties and thermal stability can be formed. The results obtained can be used to optimize the technological parameters of the synthesis and development of new functional ceramic materials for use in microwave and electronic engineering.

Keywords: eutectic, melting point, ceramic materials, subsolidus structure, firing temperature.

Отримано редколегією 27.03.2026

Борисенко Оксана Миколаївна (Oksana Borysenko), д-р техн. наук, професор, професор Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», <https://orcid.org/0000-0002-2746-6797>;

Горбунов Костянтин Олександрович (Kostiantyn Gorbunov), канд. техн. наук, доцент, зав. каф. Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», <https://orcid.org/0000-0002-0078-6520>;

Логвінков Сергій Михайлович (Sergey Logvinkov), д-р техн. наук, професор, професор Харківського національного університету міського господарства імені О.М. Бекетова, <https://orcid.org/0000-0001-5957-2386>;

Шабанова Галина Миколаївна (Galina Shabanova), д-р техн. наук, професор, професор Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», <https://orcid.org/0000-0001-7204-940X>.

М. О. Борисенко, аспірант, І. В. Сінкевич, канд. техн. наук, доцент

ІННОВАЦІЙНІ ШЛІФУВАЛЬНО-ПОЛІРУВАЛЬНІ ПАСТИ НА ОСНОВІ СКЛЯНОГО АБРАЗИВУ ТА ПОЛІМЕРНОГО ВОСКУ

*Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут",
Харків, Україна*

Ключові слова: шліфувально-полірувальна паста, скляний абразив, полімерний віск, вторинна сировина, переробка, пластифікатор, диспергатор.

Вступ. На сьогодні Україна має значну потребу у шліфувально-полірувальних пастах (ШПП), зокрема для обробки скла, кераміки та деревини. Це зумовлено розвитком таких галузей, як автомобільна (полірування автомобільного скла та кузовів є важливою частиною обслуговування та ремонту транспортних засобів.), меблева (активно використовує шліфувально-полірувальні пасти для обробки металевих елементів меблів, таких як фурнітура, ніжки, ручки, замки, петлі та інші деталі), будівельна та ювелірна (потребує використання спеціалізованих паст для досягнення бажаного блиску та якості поверхні виробів) промисловість, де необхідна висока якість обробки поверхонь. Отже, все це, зумовлює потенціал для розвитку виробництва ШПП в Україні. При цьому, особливо актуальним є створення інноваційних ШПП в яких, використовується абразив (скла) та зв'язувальний матеріал (полімерний віск), представлені вторинними матеріалами, отриманими при переробці відходів техносфери.

Мета та постановка завдання дослідження. Виробництво ШПП з матеріалів, які замість зберігання та накопичення на сміттєзвалищах де вони забруднюють довкілля [1, 2], вважається екологічно та економічно позитивним моментом у розвиненні та промисловому впровадженні цієї технології. Разом з цим, такі ШПП не містять токсичних розчинників або важких металів, мінімізують ризик утворення пилу небезпечних матеріалів, якщо частки скляного порошку стабілізовані у восковій матриці. Перспективність використання скляного бою як сировини для виробництва абразиву для ШПП, представимо у вигляді структурної схеми, наведеної на рис. 1.

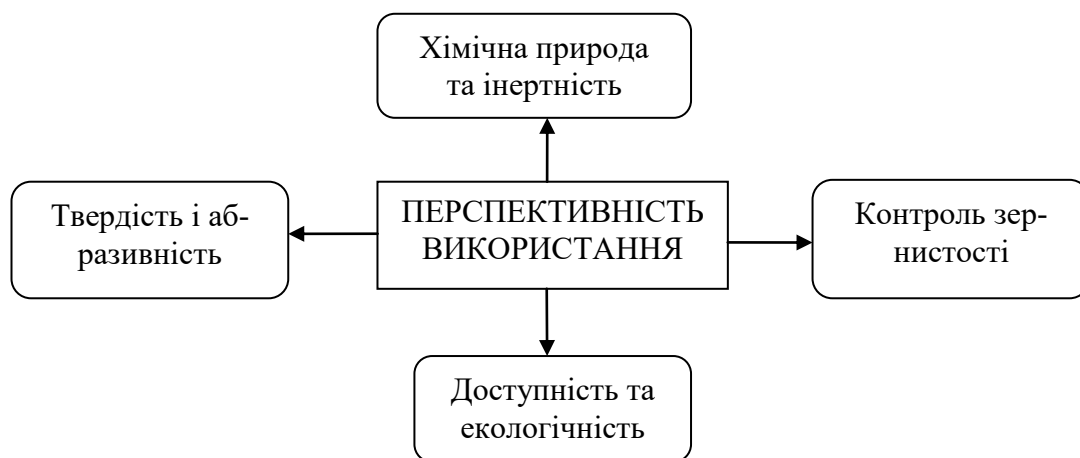


Рисунок 1 – Перспективність використання скляного бою як сировини для виробництва абразиву для ШПП

Хімічна природа та інертність. Скло – це аморфний неорганічний матеріал, який зазвичай отримують шляхом плавлення кремнезему (SiO_2) з лужними оксидами (Na_2O , K_2O) та іншими добавками (Al_2O_3 , MgO), які підвищують хімічну стабільність, міцність, стійкість до вологи [3]. Завдяки своїй природі скло є хімічно інертним – не вступає у реакцію з іншими компонентами ШПП (зв’язувальною речовиною, пластифікаторами, барвниками тощо), не утворює небезпечних сполук. ШПП з скляним абразивом не окислюються і не втрачають абразивних властивостей при зберіганні.

Твердість і абразивність. Твердість скла залежить від його складу та типу, але в середньому, за шкалою Моосу, складає 6–7 од., що вище за мідь та її сплави, сталь і близько до карбіду кремнію [4]. Отже, скло має достатню твердість для ефективного полірування металів, пластмас і лакованих поверхонь. Скло легко дробиться під механічним навантаженням, утворюючи гострі нові грані, які підвищують абразивність. Це особливо корисно у пастах, оскільки зумовлює загострення кутів частинок під час шліфування поверхні матеріалів. Твердість і абразивність скла забезпечує здатність ефективно шліфувати скло, метали, кераміку, деревину, пластики.

Контроль зернистості абразиву – критично важливий фактор для ШПП, бо він визначає інтенсивність обробки та якість поверхні. Контроль зернистості скла дозволяє регулювати абразивність пасти, від грубого шліфування до високоякісного полірування [5]. Подрібнене скло легко класифікувати (сита, просіювання) до потрібної фракції (див. табл. 1) задля отримання ШПП різного функціонального призначення.

Таблиця 1 – Орієнтири розмірів часток скляного абразиву в ШПП

Призначення ШПП	Розмір часток, мкм	Ефект на поверхню
Груба шліфовка (зняття шару)	40–100	Швидке зняття матеріалу, шорстка поверхня
Середнє шліфування	20–40	Усунення дефектів, підготовка до полірування
Тонке шліфування	5–20	Рівна поверхня, мінімальні подряпини
Полірування/фініш	1–5	Глянець, дзеркальна гладкість

Для ШПП зі вторинного скла важливо підтримувати стабільну, вузьку фракцію, щоб частки абразиву ефективно і безпечно виконували свої функції. Частки менше 1 мкм практично не ефективні як абразив, бо не знімають матеріал, а лише шліфують м’яко. Частки понад 100 мкм можуть залишати подряпини і застосовуватися лише для грубих робіт. Також зазначимо, що дрібні частки (1–10 мкм) утримуються рівномірно і не осідають. Великі частки (50–100 мкм) можуть осідати або утворювати агрегати погіршуючи однорідність ШПП.

Доступність та екологічність. Основним джерелом абразиву для ШПП – скляного бою в Україні виступає як руйнування будівель та об’єктів інфраструктури (вікна житлових будинків, адміністративних та комерційних споруд; скляні фасади, перегородки, двері та дахові панелі), так і відходи та бій комерційного або побутового скла (браковані листи скла, під час транспортування або обробки; бій склянок, банок, пляшок тощо). В Україні функціонують підприємства, які займаються переробкою скла та виробництвом скляної продукції [6], але внаслідок логістичних проблем та скорочення потужностей переробки, значна частина скла (особливо після руйнувань) не потрапляє на заводи та накопичується на полігонах або несанкціонованих звалищах. Саме цю час-

тину відходів доцільно використовувати для отримання абразиву для ШПП. Використання вторинного скла значно дешевше, ніж натуральних мінералів (карбід кремнію, оксид алюмінію). ШПП з склобоєм є економічно вигіднішими для промислового виробництва. Екологічність таких ШПП полягає в наступному: використання вторинної сировини – переробка відходів у корисний продукт; застосовується без використання агресивних кислот або лугів; не виділяє токсичних речовин при зберіганні або застосуванні; після використання залишки пасти безпечні для утилізації.

В якості зв'язувальної основи до абразиву – скла доцільно використовувати полімерний віск – фракцію (C_{20} - C_{40}), отримана при термічному піролізу твердих вторинних поліетилену (ПЕ), поліпропілену (ПП) та полістиролу (ПС) [7]. Фізико-хімічні фактори сумісності запропонованих абразиву та зв'язувальної основи, представлені в табл. 2.

Таблиця 2 – Фізико-хімічні фактори сумісності абразиву та зв'язувальної основи

Фактор сумісності	Пояснення
Хімічна інертність	Скло є аморфним кремнеземом і не реагує з вуглеводневим полімерним воском.
Полярність	Скло має полярну поверхню, а полімерний віск – неполярний, що зменшує хімічну взаємодію, але для пасти це добре: абразив залишається механічно активним.
В'язкість матриці	Віск забезпечує рівномірне утримання часток скла, запобігає їх осіданню.
Механічна сумісність	Полімерний віск пом'якшує контакт часток з оброблюваною поверхнею, мінімізуючи виникнення подряпин від грубих граней скла.

Таким чином, метою даної статті виступає розробка рецептур ШПП на базі скляного абразиву та полімерного воску, які, сьогодні, є перспективними для застосування при обробці скла (чорнове шліфування скляних виробів; підготовка поверхні перед поліруванням SeO_2), обробці пластмас і полімерних виробів (полірування оргскла (ПММА), полікарбонату, епоксидних деталей, коли потрібна помірна абразивність; вирівнювання поверхонь пластмасових моделей (наприклад, у 3D-друку), металевих поверхонь (очищення й легке полірування алюмінію, міді, латуні, бронзи у тих випадках, коли абразиви типу Al_2O_3 чи SiC надто «жорсткі» і залишають глибокі подряпини), деревини і лакофарбових покриттів (шліфування деревини, фанери, шпону з метою отримання гладкої поверхні; полірування лаків та фарб перед нанесенням фінішного шару (аналог паст з мікрокварцом); фінішне шліфування деталей з композитів (епоксидно-скляні матеріали); використання в автосервісах для полірування фар зі скла або пластику).

Задля поставленої мети необхідно провести серію лабораторних досліджень з визначення основних показників якості ШПП, отриманих по розробленим рецептурам, визначити змінення значень цих показників при тривалому зберіганні ШПП.

Аналіз публікацій. На сьогоднішній день, скляний бій досить широко використовується у якості сировини при виробництві нових склотарних виробів (до 80 % шихти у виробництві пляшок може становити склобій, що сприяє економії до 25–30 % енергії при плавленні) [8]; у будівництві (виробництво мінеральної вати; добавка у цемент,

бетон, асфальт; сировина для плитки, керамограніту, декоративних матеріалів) [9]; у хімічній промисловості (сировина для глазурі, емалей, кераміки; використання в склокристалічних матеріалах) [10, 11]; в екології та енергетиці (фільтраційний матеріал для очищення води і газу); відбивач у сонячних панелях) [12–15].

В Україні існують розробки та виробництво ШПП, зокрема для обробки скла, металів, деревини та декоративних виробів з полімерів, але інформація щодо виробництва ШПП зі скляним абразивом не є широко представленою у відкритих джерелах. Тому, це, в остаточному підсумку, можна розглядати в якості перспективної ніші для подальших досліджень та розробок у галузі матеріалознавства та нафтохімії.

Однак, для отримання абразиву для ШПП із скляного бою, його необхідно попередньо підготувати – подрібнити до необхідних розмірів (див. табл. 1) використовуючи наступні технологічні рішення [16–18]: механічне подрібнення (кульові млини (керамічні або сталеві кулі) забезпечують зернистість до 10–20 мкм; вібраційні млини забезпечують зернистість до 5–15 мкм; струменеві млини (jet mills) забезпечують зернистість до 1–5 мкм без перегріву і забруднення); хімічно-механічне подрібнення (використання термічного шоку (нагрівання → різке охолодження → крихкість) перед подрібненням; хімічне травлення HF або NaOH для доведення до наночасточок (дорого і небезпечно, тому малопридатне для масового виробництва ШПП).

Сортування та контроль зернистості при подрібненні скляного бою доцільно здійснювати за рахунок використання сит з мікроотвором для грубого розділення [19], аерокласифікації (повітряні сепаратори) задля відділення легких і дрібних часток [20, 21]; лазерної гранулометрії (контроль розподілу за розміром) [22].

Матеріали та методи дослідження.

Матеріали. Зв'язувальною основою до ШПП виступав полімерний віск (фракція C₂₀-C₄₀), отриманий при термічному піролізу твердих вторинних ПЕ, ПП та ПС. Технологія отримання та властивості полімерного воску, представлені у роботі [7]. Абразивом виступав скляний бій, отриманий при руйнуванні віконного (листового) содово-вапняного силікатного скла (Soda-lime glass), яке використовувалось у склопакетах, відповідно до DSTU EN 1279-1. Содово-вапняне силікатне скло мало наступні фізико-механічні характеристики: густина – 2,47 г/см³; твердість за Моосом – 6 од.; модуль пружності біля 70 ГПа; міцність на стискання – 700 МПа; міцність на вигін 50 МПа; теплопровідність – 1,0 Вт/(м×К); коефіцієнт термічного розширення – 9,0×10⁻⁶ К⁻¹; температура плавлення – 1500 °С. Додатковими компонентами ШПП можуть виступати пластифікатор – індустріальна олива I-20 та диспергатор – стеаринова кислота. Пластифікатор покращує змочування скла, знижує крихкість пасти, сприяє кращому розподіленню абразиву, а диспергатор гідрофобізує поверхню SiO₂, зменшує агломерацію, підвищує зчеплення зі воском.

Методика отримання абразиву. Перед подрібненням скляний бій сортували – видаляли металеві вclusions, пластик, крупні сторонні домішки. Проводили попереднє дроблення у молотковій дробарці до фракції <1–5 мм. Далі скляний бій промивали водою та висушували при 105 °С протягом 60 хвилин. Остаточне подрібнення скляного бою відбувалося в лабораторному кульовому млині (об'єм завантаження 3 дм³). В якому робочий стальний барабан заповнювався на 40–50 % об'єму стальними кульками та на 15–20 % об'єму – склом. Діаметр сталих кульок складав: 10–15 мм – для грубого помелу (до 100–50 мкм); 5–10 мм – для середнього помелу (20–30 мкм) та 2–5 мм – для тонкого помелу (5–10 мкм). Співвідношення скла до кульок: 1 : 5–10 (по масі). Стосовно режиму роботи млина слід зазначити, що швидкість обертання барабану

складала 60–80 об./хв., а тривалість подрібнення 30 хв. для отримання абразиву грубого помелу, 2–3 год – для середнього помелу та 4–6 год – для тонкого помелу. Після помелу відділяють скляний порошок від кульок та класифікують його за розміром.

Методика отримання ШПП. Полімерний віск, завантажують лабораторний термостатичний стакан з мішалкою. Нагрівають його до 90–100 °С, підтримуючи його однорідне розплавлення при помірному перемішуванні та додають зважену кількість пластифікатору (до 10 %). Дрібнодисперсний абразив у певній кількості змішують із сумішшю, яка складається із частини розплавленого рідкого воску та диспергатору (до 2 %) задля утворення концентрованої суспензії, що зменшує грудкування. У суміш розплавленого воску і пластифікатору тонким струменем додають абразивну суспензію, інтенсивно перемішуючи мішалкою з лопатями при швидкості обертання 500–800 об/хв) протягом 60 хвилин. Далі суміш охолоджували та підвергали лабораторному дослідженню.

Методи дослідження ШПП. Лабораторне дослідження отриманих зразків ШПП проводилося з використанням стандартних методик: густина (ρ , кг/м³) за ASTM D1475, пенетрація (x , мм $\times 10^{-1}$) за ASTM D217, стійкість до фазового розшарування (ψ , %) за ASTM D4424, швидкість видалення матеріалу (абразивність) за адаптованим для ШПП ASTM G65, якість шорсткості поверхні після шліфування-полірування за ASTM B46.1. Разом із стандартизованими методами використовувався метод візуальної оцінки висихання ШПП (погіршення нанесення, утворення твердої кірки на поверхні тощо), розмазуваність ШПП (Spreading Test) [7] та термостійкість ШПП.

Термостійкість ШПП визначається температурою при якій зв'язувальна основа пасти – полімерний віск, переходить з твердого до рідкого стану, тобто перестає утримувати форму на поверхні. Визначення проводили у наступний спосіб: на очищену від пилу та знежирену пластину (матеріал – Сталь 3) наносили тонкий шар пасти (0,2–0,5 мм). Далі цю пластину розміщали у повітряній бані, розташованій на електричній плитці. Поступово підвищували температуру повітряної бані (до 5 °С/хв), регулярно спостерігаючи за станом ШПП. Температура при якій ШПП починає розтікатися на поверхні пластини, вважають температурою плавлення – переходу до рідкої консистенції. Визначення вважається точним, якщо 3–5 повторів дають однакову температуру ± 1 °С.

Результати та їх обговорення. Задля лабораторного дослідження можливості отримання ШПП з абразивом – склом та зв'язувальною основою – полімерний віск, різного функціонального призначення, було розроблено рецептури (див. табл. 3), які доцільно використовувати при грубому, середньому, тонкому шліфуванні, а також поліруванні.

Таблиця 3 – Рецептури досліджуваних ШПП

Компонент	Вміст компонентів в залежності від призначення ШПП, %			
	Грубе шліфування	Середнє шліфування	Тонке шліфування	Полірування
Абразив (скляний пил)	60	45	35	25
Полімерний віск (C ₂₀ –C ₄₀)	33	47	55	65
Пластифікатор (олива І-20)	5,5	6,5	8	8
Диспергатор – C ₁₈ H ₃₄ O ₂	1,5	1,5	2	2

Нижче наведемо обґрунтування використання кожного компоненту у складі запропонованих рецептур ШПП.

ШПП для грубого шліфування. Така ШПП повинна бути жорсткою задля швидкого зняття матеріалу. Це забезпечує вміст крупнозернистий (70–100 μm) скляний порошок – абразив. Саме вміст абразиву на рівні 60 % дає високу швидкість зняття матеріалу і економічну ефективність використання вторинної сировини. При цьому, вона характеризується обмеженою розмазуваністю і ризиком седиментації абразиву при недостатній в'язкості зв'язувальної основи. Полімерний віск на рівні 33 % формує тверду матрицю, зв'язує абразивні частки, дає потрібну консистенцію для нанесення. Він має хорошу адгезію до поверхонь і термостійкість. Олива I-20 у кількості 5,5 % є тієї рідкою фазою, що змочує абразив, підвищує пластичність, полегшує нанесення і розмазування. Наведений низький вміст робить пасту доволі твердою, потрібною для грубого шліфування, де надмірна «м'якість» не бажана. Олеїнова кислота у кількості 1,5 % працює як диспергатор/змочувач і частковий пластифікатор; зменшує агрегацію скляних часток і покращує змочування воском/оливою. 1,5 % – типовий ефективний рівень при великому вмісті абразиву.

ШПП для середнього шліфування. Вміст середньозернистого абразиву на рівні 45 % (20–40 μm), забезпечує помітне зняття матеріалу, але не настільки швидко, як 70–100 мкм. Доля 45 % робить пасту збалансованою: достатньо абразиву для ефективності, але знижує ризик надмірної зернистої поверхні і полегшує розмазуваність у порівнянні з 60 %. Велика частка воску (47 %) формує міцну матрицю, утримує абразивні частинки, зменшує стікання і седиментацію, дає контрольовану консистенцію. При 47 % паста буде відносно тверда, що корисно при операціях, де потрібно уникати «фрозткання» матеріалу і забезпечити концентровану дію абразиву. Полімерний віск дає кращу адгезію до поверхні ніж деякі парафіни; добре сумісний з піролізним ПЕ. Вміст оливи I-20 на рівні 6,5 % дозволяє забезпечити певний компроміс: паста не дуже м'яка, але має помітне покриття поверхні оброблення. Це підвищує ефективну площу контакту та зменшує ризик зрізування крупних зерен. Олеїнова кислота на рівні 1,5 % – це типовий ефективний рівень для середньозернистих сумішей.

ШПП для тонкого шліфування. Вміст 35 % дрібнозернистого абразиву (5–20 μm) дає помірну абразивність та відносно тонку шорсткість поверхні, підходить для передполірувальної стадії. Саме такий вміст абразиву (35 %) можна розглядати як компроміс: досить абразиву для ефективного зняття, але достатньо матриці (воску/оливи) для гарного покриття поверхні і розмазуваності. Менший об'єм твердих часток знижує ризик агресивного «різання» і зменшує забивання інструмента. Висока (55 %) частка воску створює міцну матрицю, утримує абразив і забезпечує стабільність суспензії (мінімальна седиментація). При цьому, досягається більш тверда текстура пасти, але у поєднанні з 8 % оливи, вона має достатню пластичності для нанесення. Вміст оливи I-20 на рівні 8 % зволожує частки абразиву, покращує розмазуваність і зменшує тертя та допомагає надати ШПП кращого контакту з оброблюваною поверхнею та змінює ступінь абразивного контакту (пом'якшує зняття). Дещо підвищений вміст олеїнова кислоти (2 %) є виправданим для дрібнішого абразиву з більшою питомою поверхнею.

ШПП для полірування. Дрібний абразив (1–5 мкм) призначений для тонкого шліфування / передполірування / фінішної обробки. Вміст на рівні 25 % є збалансованим, оскільки забезпечує достатньо частинок для досягнення потрібної шорсткості та тонкого зняття, але не надто багато, щоб не підвищувати питому поверхню і потребу в

диспергаторі. Очікується делікатне, контрольоване зняття матеріалу та хороша якість поверхні. Висока частка воску (65 %) утворює міцну, стабільну матрицю, що утримує дрібні абразивні частки і запобігає седиментації. Паста буде досить твердою при кімнатній температурі, але з 8 % оливи матриця залишається пластичною під навантаженням. Вміст оливи I-20 на рівні 8 % є достатнім для якісного змочування дрібних часток, покращення розмазуваності та гомогенності контактної площі. Забезпечує потрібний баланс між пластичністю та стабільністю. Вміст олеїнової кислоти у кількості 2 % є доцільним через велику питому поверхню дрібного абразиву, зменшує агрегацію, покращує змочування часток воском/оливою і стабілізує суспензію.

Результати проведених лабораторних досліджень запропонованих рецептур ШПП різного функціонального призначення, представлені у табл. 4.

Таблиця 4 – Показники якості отриманих ШПП

Показник	Функціональне призначення ШПП			
	Грубе шліфування	Середнє шліфування	Тонке шліфування	Полірування
Термостійкість, °C	50	53	55	60
Густина при 20 °C, (ρ), кг/м ³	1610	1420	1250	1160
Пенетрація при 25 °C, (x), мм $\times 10^{-1}$	25	47	64	78
Стійкість до фазового розшарування (ψ), % утримання	77	85	91	98
Розмазуваність, (S), см ²	9	12	15	20
Швидкість видалення матеріалу (MRR), г/хв.	3,0	1,6	0,5	0,15
Якість шорсткості поверхні після шліфування-полірування (R_a), мкм	2,2	1,1	0,4	0,1
Час висихання, міс.	6–8	9–12	12–15	15–18

Очевидно, що із збільшенням вмісту воску у ШПП (від 33 до 65 %) збільшується і її термостійкість (від 50 °C до 60 °C), оскільки віск формує стійку матрицю. Підвищення вмісту оливи I-20 (від 5,5 % до 8 %) та олеїнової кислоти (від 1,5 до 2,0 %), збільшує пластичність, але сприяє зниженню термостійкості. При цьому, дрібні частки (1–5 мм) абразиву трохи підвищують термостійкість шару ШПП через щільніше упакування, але ефект невеликий.

Із збільшенням вмісту абразиву (від 25 до 60 %) у ШПП – збільшується її густина – від 1160 кг/м³ до 1610 кг/м³, оскільки абразив має досить високе значення густини (2500 кг/м³), у порівнянні з іншими компонентами (полімерний віск – 910 кг/м³; олива I-20 – 884 кг/м³; олеїнова кислота – 895 кг/м³).

Чим більше абразиву у складі ШПП, тим вона твердіша і характеризується нижчою пенетрацією (при вмісті 60 % абразиву розміром зерен 70–100 мкм, найменше зна-

чення penetрації – $25 \text{ мм} \times 10^{-1}$). При високому вмісті абразиву паста утворює щільну кристалічну структуру частинок, яка перешкоджає проникненню твердого тіла у структуру ШПП. Велика зернистість абразиву – частинки розміром 70–100 мкм, формують грубу, жорстку ШПП, яка характеризується низькою penetрацією. Дрібнозернові частинки абразиву (1–5 мкм) формують більш однорідну структуру ШПП, вона є пластичною та характеризується високим значенням penetрації ($78 \text{ мм} \times 10^{-1}$). Чим більше полімерного воску та оливи у складі ШПП, тим м'якіша матриця, легше деформується під зовнішнім навантаженням та характеризується підвищеними значеннями penetрації. При цьому, в'язка матриця компенсує твердість абразиву. Додавання олеїнової кислоти покращує розмазуваність і знижує тертя, трохи підвищуючи значення penetрації. Вплив невеликий, але помітний у дуже м'яких ШПП. Таким чином, при високому вмісті абразиву, що має крупне зерно, ШПП є твердою, з низькою penetрацією; при меншому вмісті абразиву, що має малу зернистість ШПП є м'якою, з високою penetрацією.

Розмазуваність ШПП зростає (від 9 см^2 до 20 см^2) із зменшенням вмісту абразиву, зменшенням його зернистості та збільшенням вмісту матриці (полімерний віск + олива І-20).

Швидкість видалення матеріалу (MRR) на пряму залежить від вміст абразиву (%) та його зернистості – чим більший вміст абразиву, тим вищий потенційний MRR. Абразив з зернистістю 70–100 мкм мають вищу здатність різати та швидко видаляти матеріал, абразив з зернистістю 20–50 мкм та 10–20 мкм – працює м'яко, багато з них шліфують поверхню, але з меншою швидкістю зняття. Із збільшенням вмісту зв'язувальної основи та пластифікатору, тим суттєвіше знижується абразивна дія (малий контактний тиск на зерно), тому MRR знижується. Олеїнова кислота – впливає мало на MRR, більше на якість поверхні/розмазуваність. Отже, зі зниженням вмісту абразиву у ШПП (від 60 % до 25 %) та зернистості абразиву (від 70–100 мкм до 1–5 мкм), спостерігається зниження MRR – від 3,0 г/хв. до 0,15 г/хв. (див. табл. 3).

Стійкість до фазового розшарування (ψ , %) суттєво залежить від таких факторів як густина і форма частинок (більш важкі частинки (вища ρ) осідають швидше), в'язкість зв'язувальної основи (чим вища в'язкість, тим краще зв'язувальна основа – матриця утримує абразив), розмір частинок (великі частинки осідають набагато швидше), агрегація (наявність агломератів значно погіршує ψ ; добре дисперговані ШПП витримують центрифугування краще) та температура (підвищення температури зменшує в'язкість матриці, тим самим, знижуючи величину ψ). Отже, великий вміст (60 %) грубих/важких зерен (70–100 мкм) призводить до швидкого осідання абразиву, оскільки тонка матриця не здатна утримувати частинки; помірний вміст абразиву (45 %) і більш в'язка зв'язувальна основа дають кращу стабільність; середні зерна (20–40 мкм) частково осідають; дрібніші частинки (5–20 мкм) при вмісті 35 % у своїй більшості залишаються в однорідній фазі; низький вміст абразиву (25 %), дуже дрібні зерна (1–5 мкм) забезпечують найвищу стійкість до розшарування.

Якість шорсткості поверхні після шліфування-полірування (R_a , мкм) суттєвим образом залежить від: розміру абразивних частинок (визначає мінімальний можливий рівень R_a); вмісту абразиву (чим більше часток, тим інтенсивніше знімається шар, але й вищий ризик залишити глибші подряпини); характеру зв'язувальної матриці (віск + олива + кислота), яка відповідає за рівномірність розподілу абразиву і ступінь згладжу-

вання мікрорельєфу; фракційності (великі зерна залишають сліди десятків мікрметрів, наддрібні – забезпечують полірування до субмікронного рівня).

ШПП для грубого шліфування містить дуже грубий абразив (70–100 мкм), висока частка (60 %) забезпечує сильне знімання, але залишає глибокі подряпини. ШПП для середнього шліфування містить середній абразив (20–40 мкм), а збалансована матриця забезпечує шліфувальний режим із помітним згладжуванням. ШПП для тонкого шліфування містить дрібний (5–10 мкм) абразив та високий вміст зв'язувальної матриці, що забезпечує тонке шліфування-полірування з досягненням ближчого до дзеркального рівня. ШПП для полірування містить дуже дрібний абразив (1–5 мкм), невелика кількість частинок (25 %), що забезпечує чисте полірування до дзеркального блиску.

Час висихання (зберігання без втрати пластичності) для ШПП визначається головним чином: вмістом оливи I-20 (чим більше, тим довше не висихає); часткою полімерного воску (утримує структуру, але схильний до повільної кристалізації); вмістом олеїнової кислоти (покращує диспергування та дещо знижує швидкість висихання); фракцією абразиву (великі частинки прискорюють фазове розшарування і «підсушування», дрібні є більш стабільними). Згідно проведених досліджень, отримані ШПП зберігають робочі властивості від 6 до 18 міс., залежно від свого складу.

Таким чином, зважаючи на отримані результати лабораторного дослідження зазначимо, що ШПП (60% абразиву (70–100 мкм) / 33% полімерний віск / 5,5 % олива I-20 / 1,5% олеїнова кислота) може бути ефективно використана для чорнового шліфування твердих сплавів, сталі, чавуну. Забезпечує швидке зняття матеріалу, але залишає грубу поверхню та може замінити пасти з карбідом кремнію великої зернистості (F60–F80). ШПП (45 % абразиву (20–40 мкм) / 47 % полімерний віск / 6,5 % олива I-20 / 1,5 % олеїнова кислота) підходить для напівчистового шліфування та підготовки поверхні до полірування при інструментальному виробництві, машинобудуванні, відновленні деталей. Може замінити середньозернисті пасти на оксиді алюмінію (типу ГОІ №2). ШПП (35 % абразиву (5–10 мкм) / 55 % полімерний віск / 8 % олива I-20 / 2 % олеїнова кислота) доцільно використовувати при чистовому полірування металів, скла, кераміки; формуванні напівдзеркальної поверхні. Вона виступає аналогом дрібнозернистих ГОІ-паст (№3) або паст на основі оксиду хрому/оксиду алюмінію з розміром частинок 5–10 мкм. ШПП (25 % абразиву (1–5 мкм) / 65 % полімерний віск / 8 % олива I-20 / 2 % олеїнова кислота) перспективно застосовувати для фінішного полірування до дзеркального блиску в таких галузях промисловості як: оптика, приладобудування, інструментальне виробництво, полірування скла й кольорових металів. Вона виступає аналогом високоякісних паст на основі оксиду церію або дрібнодисперсного оксиду хрому.

Висновки. Розроблені шліфувально-полірувальні пасти на основі полімерного воску, відпрацьованої оливи I-20 та олеїнової кислоти з різними концентраціями абразивної фази (склофрагменти різної зернистості) демонструють широкий діапазон технологічних властивостей – від інтенсивного знімання матеріалу $R_a = 2,2$ мкм (ШПП для грубого шліфування) до отримання дзеркальної поверхні з $R_a = 0,1$ мкм (ШПП для полірування).

Ключовими перевагами отриманих ШПП виступають:

– регульованість властивостей за рахунок варіювання фракційного складу та кількості абразиву (можна отримати пасти як для грубого шліфування, так і для тонкого полірування).

– висока стабільність до фазового розшарування (ψ до 95 %) та подовжений термін зберігання (до 18 міс.), що перевищує показники багатьох традиційних паст.

– екологічність і ресурсозбереження – використання вторинної сировини (відпрацьованої оливи та полімерних восків) зменшує вартість ШПП та знижує навантаження на довкілля.

універсальність застосування (від машинобудування та інструментального виробництва до оптичної та скляної промисловості).

– конкурентоспроможність відносно промислових аналогів (ГОІ-пасти, пасти на основі SiC, Al₂O₃, CeO₂), з можливістю часткової чи повної заміни імпорتنих продуктів.

Таким чином, запропоновані композиції є перспективними для впровадження у промисловість завдяки поєднанню високих експлуатаційних властивостей, технологічної гнучкості та економічної доцільності, що відкриває можливості для створення вітчизняної лінійки шліфувально-полірувальних матеріалів нового покоління.

Література

1. Тюлькіна К. О., Колонтай С., Камбур О. Проблеми утилізації відходів в Україні: публічне управління та підприємницький аспект. *Київський економічний науковий журнал*. 2025. № 9. С. 270–278. DOI: <https://doi.org/10.32782/2786-765X/2025-9-36>.
2. Сторожук В. М., Кшивецький Б. Я., Маєвська О. М., Ференц О. Б. Особливості управління відходами в сучасних умовах. *Вісник ЛДУБЖД*. 2024. № 30. С. 48–55. DOI: <https://doi.org/10.32447/20784643.30.2024.05>.
3. Лосик М. В., Звір О. М. Технологічні та фізико-хімічні властивості скла : навч. посіб. Львів : ЛНАМ, 2018. 40 с.
4. Вахула Я. І., Магорівська Г. Я. Фізико-хімічні властивості скла. Методи визначення та розрахунку : навчальний посібник. Львів : Левада, 2022. 158 с.
5. Stempkowska A., Gawenda T., Chajec A., Sadowski L. Effect of Granite Powder Grain Size and Grinding Time of the Properties of Cementitious Composites. *Materials*. 2022. 15(24). 8837. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma15248837>.
6. Жданюк Н. В., Піхуля Н. Д. Аналіз відходів і джерел забруднення скляного виробництва. *Вісник ХНТУ*. 2023. № 1(84). С. 9–17.
7. Борисенко М. О., Сінкевич І. В. Полімерний віск як основа для виробництва шліфувально-полірувальні паст. *Інтегровані технології та енергозбереження*. 2025. № 3.
8. Epure C., Munteanu C., Istrate B., Harja M., Buium F. Applications of Recycled and Crushed Glass (RCG) as a Substitute for Natural Materials in Various Fields – A Review. *Materials*. 2023. 16(17). 5957. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma16175957>.
9. Heriyanto, Pahlevani F., Sahajwalla V. From waste glass to building materials – An innovative sustainable solution for waste glass. *Journal of Cleaner Production*. 2018. 191. P. 192–206. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.04.214>.
10. Gol F., Yilmaz A., Kacar E., Simsek S., Saritas Z. G., Ture C., Arslan M., Bekmezci M., Burhan H., Sen F. [Назва статті відсутня в оригіналі]. *Ceramics International*. 2021. 47(15). P. 21061–21068. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.04.108>.

11. Almendro-Cande M. B., Jordán Vidal M. M. Glasses, Frits and Glass-Ceramics: Processes and Uses in the Context of Circular Economy and Waste Vitrification. *Coatings*. 2024. 14(3). 346. DOI: <https://doi.org/10.3390/coatings14030346>.
12. Ahmad S., Mac-Allister Cedraz F., Borne N., Albert J. N. L., Aw T. G. Characterization and evaluation of recycled glass sand as water filtration media. *Journal of Water and Health*. 2025. 23(6). P. 780–793. DOI: <https://doi.org/10.2166/wh.2025.023>.
13. El-Sayed M. S. I., Razek T. A. A. M., Mohamed Y. H. Utilization of crushed glass and ceramic wastes as a filtration medium in drinking water plants. *Journal of Environmental Science*. 2018. 44(2). P. 19–33. DOI: <https://doi.org/10.21608/jes.2018.35408>.
14. Tedjokusuma K., Lauth W., Willenbacher N. Manufacture and filtration performance of glass filters made from capillary suspensions. *Separation and Purification Technology*. 2024. 329. 125097. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2023.125097>.
15. Ritter K., McBride A., Chambers T. Soiling Comparison of Mirror Film and Glass Concentrating Solar Power Reflectors in Southwest Louisiana. *Sustainability*. 2021. 13(10). 5727. DOI: <https://doi.org/10.3390/su1310572>.
16. Sun L., Kim M., Doh J.-H., Zi G. A Novel Method of Crushing Glass. *KSCE Journal of Civil Engineering*. 2021. 25(12). P. 4763–4770. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12205-021-2341-6>.
17. Orhorhoro E. K., Oghoghorie O. Design of Hammer Mill for Crushing of Glass Waste. 2017. 1. P. 1–7.
18. Rank P., Hacker N., Gerdes T. Influence of the initial morphology on the dry-milling behavior of glass. *Powder Technology*. 2025. 467. 121490. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2025.121490>.
19. Stoops G. Interpretation of Micromorphological Features of Soils and Regoliths. 2nd ed. Elsevier, 2018. 982 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/C2014-0-01728-5>.
20. Varukha D. A., Smirnov V. A., Edl M., Demianenko M. M., Yukhymenko M. P., Pavlenko I. V., Liaposhchenko O. O. Modelling of Separation and Pneumatic Classification Processes of Airodisperse Systems in the Shelf Device. *Journal of Engineering Sciences*. 2018. 5. P. 5–9. DOI: [https://doi.org/10.21272/jes.2018.5\(1\).f2](https://doi.org/10.21272/jes.2018.5(1).f2).
21. Xing Q., Utami D. P., Demattey M. B., Kyriakopoulou K., de Wit M., Boom R. M., Schutyser M. A. I. A two-step air classification and electrostatic separation process for protein enrichment of starch-containing legumes. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*. 2020. 66. 102480. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2020.102480>.
22. Brial V., Tran H., Sorelli L., Conciatori D., Ouellet-Plamondon C. M. Effect of fluorite addition on the reactivity of a calcined treated spent pot lining in cementitious materials. *Cement*. 2023. 12. 100070. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cement.2023.100070>.

Bibliography (transliterated)

1. Tiulkina K. O., Kolontai S., Kambur O. Problemy utylizatsii vidkhodiv v ukraini : publichne upravlinnia ta pidpriemnytskyi aspekt. *Kyivskyi ekonomichnyi naukovyi zhurnal*. 2025. No. 9. P. 270–278. DOI: <https://doi.org/10.32782/2786-765X/2025-9-36>.
2. Storozhuk V. M., Kshyvetskyi B. Ya., Maievska O. M., Ferents O. B. Osoblyvosti upravlinnia vidkhodamy v suchasnykh umovakh. *Visnyk LDUBZhD*. 2024. No. 30. P. 48–55. DOI: <https://doi.org/10.32447/20784643.30.2024.05>.

3. Losyk M. V., Zvir O. M. Tekhnolohichni ta fizyko-khimichni vlastyvoli skla : navch. posib. Lviv : LNAM, 2018. 40 p.
4. Vakhula Ya. I., Mahorivska H. Ya. Fizyko-khimichni vlastyvoli skla. Metody vyznachennia ta rozrakhunku : navch. posib. Lviv : Levada, 2022. 158 p.
5. Stempkowska A., Gawenda T., Chajec A., Sadowski L. Effect of Granite Powder Grain Size and Grinding Time of the Properties of Cementitious Composites. *Materials*. 2022. 15(24). 8837. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma15248837>.
6. Zhdaniuk N. V., Pikhulia N. D. Analiz vidkhodiv i dzherel zabrudnennia sklianoho vyrob-nytstva. *Visnyk KhNTU*. 2023. No. 1(84). P. 9–17.
7. Borysenko M. O., Sinkevych I. V. Polimernyi visk yak osnova dlia vyrobnytstva shlifovalno-poliruvalni past. *Intehrovani tekhnolohii ta enerhozberezhennia*. 2025. No. 3.
8. Epure C., Munteanu C., Istrate B., Harja M., Buium F. Applications of Recycled and Crushed Glass (RCG) as a Substitute for Natural Materials in Various Fields – A Review. *Materials*. 2023. 16(17). 5957. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma16175957>.
9. Heriyanto, Pahlevani F., Sahajwalla V. From waste glass to building materials – An innovative sustainable solution for waste glass. *Journal of Cleaner Production*. 2018. 191. P. 192–206. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.04.214>.
10. Gol F., Yilmaz A., Kacar E., Simsek S., Saritas Z. G., Ture C., Arslan M., Bekmezci M., Burhan H., Sen F. [Назва статті відсутня в оригіналі]. *Ceramics International*. 2021. 47(15). P. 21061–21068. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.04.108>.
11. Almendro-Cande M. B., Jordán Vidal M. M. Glasses, Frits and Glass-Ceramics: Processes and Uses in the Context of Circular Economy and Waste Vitrification. *Coatings*. 2024. 14(3). 346. DOI: <https://doi.org/10.3390/coatings14030346>.
12. Ahmad S., Mac-Allister Cedraz F., Borne N., Albert J. N. L., Aw T. G. Characterization and evaluation of recycled glass sand as water filtration media. *Journal of Water and Health*. 2025. 23(6). P. 780–793. DOI: <https://doi.org/10.2166/wh.2025.023>.
13. El-Sayed M. S. I., Razek T. A. A. M., Mohamed Y. H. Utilization of crushed glass and ceramic wastes as a filtration medium in drinking water plants. *Journal of Environmental Science*. 2018. 44(2). P. 19–33. DOI: <https://doi.org/10.21608/jes.2018.35408>.
14. Tedjokusuma K., Lauth W., Willenbacher N. Manufacture and filtration performance of glass filters made from capillary suspensions. *Separation and Purification Technology*. 2024. 329. 125097. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2023.125097>.
15. Ritter K., McBride A., Chambers T. Soiling Comparison of Mirror Film and Glass Concentrating Solar Power Reflectors in Southwest Louisiana. *Sustainability*. 2021. 13(10). 5727. DOI: <https://doi.org/10.3390/su1310572>.
16. Sun L., Kim M., Doh J.-H., Zi G. A Novel Method of Crushing Glass. *KSCE Journal of Civil Engineering*. 2021. 25(12). P. 4763–4770. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12205-021-2341-6>.
17. Orhorhoro E. K., Oghoghorie O. Design of Hammer Mill for Crushing of Glass Waste. 2017. 1. P. 1–7.
18. Rank P., Hacker N., Gerdes T. Influence of the initial morphology on the dry-milling behavior of glass. *Powder Technology*. 2025. 467. 121490. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2025.121490>.
19. Stoops G. Interpretation of Micromorphological Features of Soils and Regoliths. 2nd ed. Elsevier, 2018. 982 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/C2014-0-01728-5>.

20. Varukha D. A., Smirnov V. A., Edl M., Demianenko M. M., Yukhymenko M. P., Pavlenko I. V., Liaposhchenko O. O. Modelling of Separation and Pneumatic Classification Processes of Airodisperse Systems in the Shelf Device. *Journal of Engineering Sciences*. 2018. 5. P. 5–9. DOI: [https://doi.org/10.21272/jes.2018.5\(1\).f2](https://doi.org/10.21272/jes.2018.5(1).f2).

21. Xing Q., Utami D. P., Dematthey M. B., Kyriakopoulou K., de Wit M., Boom R. M., Schutyser M. A. I. A two-step air classification and electrostatic separation process for protein enrichment of starch-containing legumes. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*. 2020. 66. 102480. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2020.102480>.

22. Brial V., Tran H., Sorelli L., Conciatori D., Ouellet-Plamondon C. M. Effect of fluorite addition on the reactivity of a calcined treated spent pot lining in cementitious materials. *Cement*. 2023. 12. 100070. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cement.2023.100070>.

УДК 662.7

М. О. Борисенко, аспірант, І. В. Сінкевич, канд. техн. наук, доцент

ІННОВАЦІЙНІ ШЛІФУВАЛЬНО-ПОЛІРУВАЛЬНІ ПАСТИ НА ОСНОВІ СКЛЯНОГО АБРАЗИВУ ТА ПОЛІМЕРНОГО ВОСКУ

В статті розглянуто можливість отримання шліфувально-полірувальних паст на базі вторинної сировини – скляного абразиву та поліетиленового воску. Сьогодні, основним джерелом скляного абразиву виступає скляний бій, що утворюється при руйнуванні жилих та інфраструктурних об'єктів під час ведення бойових дій на території України. Відсутність необхідних потужностей для переробки скляного бою, призводить до його накопичення на сміттєзвалищах та полігонах де він становить суттєву загрозу для навколишнього середовища. Разом з цим, значна частка накопичених відходів може перероблятися у абразив для шліфувально-полірувальних паст, які користуються значним попитом при проведенні ремонтно-відновлювальних робіт. Встановлено, що варіюючи зернистість та вміст абразиву, можна отримувати ШПП широко спектру застосування: ШПП (60 % абразиву (70–100 мкм) / 33 % полімерний віск / 5,5 % олива I-20 / 1,5 % олеїнова кислота) може бути ефективно використана для чорнового шліфування твердих сплавів, сталі, чавуну; ШПП (45% абразиву (20–40 мкм) / 47 % полімерний віск / 6,5 % олива I-20 / 1,5 % олеїнова кислота) підходить для напівчистового шліфування та підготовки поверхні до полірування при інструментальному виробництві, машинобудуванні, відновленні деталей; ШПП (35 % абразиву (5–10 мкм) / 55 % полімерний віск / 8 % олива I-20 / 2 % олеїнова кислота) доцільно використовувати при чистовому полірування металів, скла, кераміки; формуванні напівдзеркальної поверхні; ШПП (25 % абразиву (1–5 мкм) / 65 % полімерний віск / 8 % олива I-20 / 2 % олеїнова кислота) перспективно застосовувати для фінішного полірування до дзеркального блиску в таких галузях промисловості як: оптика, приладобудування, інструментальне виробництво, полірування скла й кольорових металів. Запропоновані ШПП завдяки поєднанню високих експлуатаційних властивостей, технологічної гнучкості та економічної доцільності є перспективними для впровадження у промисловість.

Ключові слова: шліфувально-полірувальна паста, скляний абразив, полімерний віск, вторинна сировина, переробка, пластифікатор, диспергатор.

M. O. Borysenko, I. V. Sinkevych

INNOVATIVE GRINDING AND POLISHING PASTE BASED ON GLASS ABRASIVE AND POLYMER WAX

The article considers the possibility of obtaining grinding and polishing pastes based on secondary raw materials - glass abrasive and polyethylene wax. Today, the main source of glass abrasive is glass cullet, which is formed during the destruction of residential and infrastructure facilities during hostilities in Ukraine. The lack of the necessary capacity for the processing of glass cullet leads to its accumulation in landfills and landfills where it poses a significant threat to the environment. At the same time, a significant portion of the accumulated waste can be processed into abrasive for grinding and polishing pastes, which are in great demand during repair and restoration work. It has been established that by varying the grain size and content of the abrasive, it is possible to obtain SPP with a wide range of applications: SPP (60 % abrasive (70–100 μm) / 33 % polymer wax / 5.5 % I-20 oil / 1.5 % oleic acid) can be effectively used for rough grinding of hard alloys, steel, and cast iron; SPP (45 % abrasive (20–40 μm) / 47 % polymer wax / 6.5 % I-20 oil / 1.5 % oleic acid) is suitable for semi-finishing grinding and surface preparation for polishing in tool production, mechanical engineering, and parts restoration; SHPP (35 % abrasive (5–10 μm) / 55 % polymer wax / 8 % I-20 oil / 2 % oleic acid) is advisable to use for fine polishing of metals, glass, ceramics; forming a semi-mirror surface; SHPP (25 % abrasive (1–5 μm) / 65 % polymer wax / 8 % I-20 oil / 2 % oleic acid) is promising to be used for final polishing to a mirror shine in such industries as: optics, instrument making, tool production, polishing of glass and non-ferrous metals. The proposed SHPP, due to the combination of high performance properties, technological flexibility and economic feasibility, are promising for implementation in industry.

Keywords: grinding and polishing paste, glass abrasive, polymer wax, secondary raw materials, processing, plasticizer, dispersant.

Отримано редколегією 04.02.2026

Сінкевич Ірина Валеріївна (Iryna Sinkevych), канд. техн. наук, доцент, професор Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», <https://orcid.org/0000-0002-6089-0266>;

Борисенко Максим Олексійович (Maksym Borysenko), аспірант Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», <https://orcid.org/0009-0001-9397-2911>.

О. Л. Ходаков, канд. техн. наук, доцент, Г. О. Саркісян, д-р екон. наук, професор,
О. В. Василик, канд. техн. наук, доцент, О. М. Мирошніченко, доцент,
Т. М. Афанасьєва, канд. техн. наук, доцент, Л. О. Ткаченко, ст. викладач,
І. Г. Ковальчук, магістр

ВИВЧЕННЯ ВПЛИВУ ТЕХНОЛОГІЙ НА ЯКІСТЬ ЧЕРВОНИХ МІЦНИХ ВИН СПЕЦІАЛЬНОГО ТИПУ (СТИЛЬ ПОРТВЕЙНУ) В УМОВАХ ОДЕСЬКОГО РЕГІОНУ

Одеський національний технологічний університет, Одеса

Ключові слова: технологія, якість, червоне міцне вино спеціального типу, портвейн, регіон, Одеський чорний.

Одеський регіон традиційно займає провідне місце у виноградарсько-виноробному комплексі України, що зумовлено поєднанням сприятливих ґрунтово-кліматичних умов, значних площ промислових виноградників та сформованої науково-виробничої бази. Саме в цьому регіоні зосереджена значна частка виноградних насаджень країни, а також виробництво основних обсягів різних типів вин, які характеризуються стабільною якістю та сортовою типовістю [1, 2].

Разом з тим, сучасні кліматичні зміни, що спостерігаються впродовж останніх десятиліть, призводять до трансформації агрокліматичних умов регіону. Зокрема, відзначається тенденція до підвищення середньорічних температур, збільшення суми активних температур у період вегетації винограду та подовження тривалості теплої пори року. Такі зміни істотно впливають на фізіолого-біохімічні процеси формування врожаю винограду, зокрема на накопичення цукрів, фенольних сполук та екстрактивних речовин, що є визначальними для виробництва міцних вин спеціального типу [3, 4, 5].

У зазначених умовах зростає науковий та практичний інтерес до можливостей виробництва спеціальних міцних вин, зокрема типу портвейну, в нетрадиційних для них регіонах. Водночас аналіз наукових публікацій свідчить про недостатню кількість комплексних досліджень, спрямованих на вдосконалення технологічних підходів до виробництва таких вин саме в умовах одеського теруару, з урахуванням його кліматичних особливостей та сортового складу виноградників.

Особливо актуальною є робота у цьому напрямку з місцевими сортами винограду, адаптованими до кліматичних і ґрунтових умов Одеського регіону, зокрема теруару дослідницького господарства ІВіВ ім. В.Є. Таїрова. Одним із таких сортів є Одеський чорний (також відомий під назвою «Аліберне»), який вирізняється глибиною кольору і потенціалом для створення вин з характером [1, 6, 7].

Задля цього у даній роботі проведено дослідження, спрямоване на наукове обґрунтування доцільності виробництва спеціальних червоних міцних вин типу портвейну в умовах Одеського регіону, а також на оцінку впливу технологічних факторів на показники якості отриманої виноробної продукції.

Відомо, що портвейн є всесвітньо визнаним міцним вином із захищеним географічним зазначенням походження, виробництво якого дозволене виключно в регіоні Дору на північному сході Португалії і використання найменування «Porto» (портвейн) для вин, виготовлених за межами цього регіону, є юридично неприпустимим відповідно до

чинного законодавства Європейського Союзу та міжнародних угод у сфері охорони географічних зазначень (Регламент (ЄС) № 1308/2013). Тому треба зазначити, що метою даного дослідження не є відтворення портвейну, як категорії захищеного походження, а наукове обґрунтування можливості виробництва в умовах Одеського регіону спеціальних червоних міцних вин з автохтонних сортів винограду за вдосконаленою прискореною технологією, стилістично максимально наближених до витриманих червоних вин портвейнового типу португальського походження.

Класична технологія виробництва вин типу портвейну включає складний технологічний процес, що поєднує в собі вирощування винограду, контрольоване бродіння, кріплення виноградним спиртом і тривалу витримку в особливих умовах [8, 9]. Кінцева якість та унікальність різних стилів портвейну значною мірою залежать від технологічних параметрів, що використовуються під час виробництва та витримки [10].

Технологічна еволюція виробництва портвейну охоплює понад два століття, з інноваціями, що з'явилися з кінця XVIII століття і продовжуються донині [11]. Традиційні методи, такі як топтання винограду в гранітних лагарах, поступово доповнювалися або замінювалися сучасними механізованими системами, тоді як методи витримки еволюціонували від простого зберігання бочок до складних, контрольованих процесів [12].

Сучасна технологія виробництва портвейну охоплює широкий спектр підходів із використанням передових аналітичних методів контролю якості на всіх технологічних етапах виробництва вина, починаючи від виноградного грона до розливу готового вина у пляшку [13,14].

Науковцями Інституту харчових досліджень лабораторії Редінга (Великобританія) спільно зі співробітниками Католицького університету (Португалія) було проведено всебічне порівняння традиційного бродіння у гранітних лагарах та бродіння у резервуарах з механічним подрібненням [8]. У дослідженні відстежувалися динаміка зростання дріжджів, зниження масової концентрації цукрів та утворення етилового спирту, а також зміни амінокислотного складу під час бродіння. Суттєвих відмінностей у цих основних характеристиках бродіння між системами лагару та резервуарів виявлено не було. Це відкриття мало важливе технологічне значення, оскільки воно підтвердило доцільність використання сучасних механізованих систем бродіння без шкоди якості кінцевого вина. Сучасне виробництво використовує закриті резервуари з нержавіючої сталі, які забезпечують кращий контроль за параметрами бродіння, зберігаючи при цьому стандарти якості, встановлені традиційними методами [12].

Критичним параметром якості у виробництві вин типу портвейну є екстракція кольору при мацерації, особливо для червоних вин. Короткий період ферментації перед збагаченням обмежує час, доступний для екстракції пігментів та фенольних сполук зі шкірки винограду. Тому Баккер та ін. [9] досліджували використання пектолітичних ферментних препаратів, для посилення екстракції кольору під час вініфікації. Авторами було показано, що використані ферментні препарати значно покращили екстракцію кольору протягом короткого періоду обробки подрібненого виноградного суслу перед збагаченням. Інструментальний аналіз показав, що вина, оброблені ферментами, були темнішими, і ці відмінності в кольорі зберігалися після 15 місяців дозрівання. Безумовно, використання ферментативної обробки дозволяє виробникам досягти покращеного вилучення кольору та сенсорних характеристик, зберігаючи при цьому короткий час ферментації, що є важливим для збереження залишкового вмісту цукру, характерного для портвейну.

Щодо питання покращення екстракції, на нашу думку, ще одним із найбільш

ефективних способів інтенсифікації екстракційних процесів під час мацерації мезги є її спиртування після часткового підброджування. Етиловий спирт, виконуючи функцію ефективного екстрагенту, сприяє максимальному переходу фарбувальних, фенольних та екстрактивних речовин у виноматеріал, що зумовлює формування його повноти, насиченості забарвлення та потенціалу майбутнього ароматичного букета. Зазначені процеси створюють передумови для виробництва спеціальних міцних вин портвейнового типу підвищеної якості та з великим потенціалом до витримки. Саме це зумовило включення технологічної операції спиртування мезги до переліку факторів, досліджуваних у межах даної наукової роботи.

Інший найважливіший фактор формування вин портвейнового типу – їх дозрівання. Класична технологія витриманих портвейнів передбачає тривалу витримку в дубових бочках з помірним споживанням кисню. Аналіз наукових досліджень свідчить, що формування якості та стилістичних особливостей вин портвейнового типу значною мірою визначається умовами витримки та дозрівання, які включають матеріал ємностей, окисно-відновний режим, температурні параметри та тривалість контакту з дубом. У традиційній португальській практиці різні стилі портвейну потребують принципово відмінних режимів витримки: так, вина типу Tawny дозрівають в умовах контрольованого окисного старіння в дубових бочках, тоді як Ruby та Vintage Port характеризуються переважно редуکتивною витримкою у великих резервуарах або пляшках з обмеженим доступом кисню [15].

Вплив матеріалу ємності на процеси дозрівання портвейнових вин був детально досліджений Но та співавт. [16], які вивчали еволюцію кольору та фенольного складу вин, витриманих у дубових бочках, резервуарах з нержавіючої сталі та скляних ємностях протягом 311 діб за температури 18 °С. Було встановлено, що зразки, витримані в дубі, дозрівали значно інтенсивніше порівняно з винами, що зберігалися у неокисних середовищах. Незважаючи на відносну стабільність загального вмісту фенольних сполук, відбувалося швидке зниження концентрації мономерних антоціанів та інтенсивне утворення полімерних пігментів, що зумовлювало зростання інтенсивності забарвлення, зміну відтінку та прискорення процесів побуріння. Відмінності редокс-потенціалу між зразками, витриманими в деревині та інертних матеріалах, свідчили про визначальну роль розчиненого кисню у формуванні швидкості та напрямку хімічних перетворень [16].

Ключову роль полімерних пігментів у стабілізації кольору портвейнових вин підтверджено також дослідженнями Mateus та співавт. [17], які простежили кінетику деградації основних антоціанідин-3-глюкозидів і продуктів їх конденсації з піровиноградною кислотою у винах, витриманих у дубових бочках протягом трьох років. Показано, що всі пігменти підкоряються кінетиці першого порядку, однак антоціанін-піровиноградні продукти характеризуються значно вищою стабільністю порівняно з мономерними формами, що обумовлює їх внесок у довготривалу стабільність кольору витриманих вин.

Сучасні напрями розвитку енології пов'язані з упровадженням концепцій прецизійного виноробства та моніторингу процесів витримки в реальному часі. Cosme та співавт. [18], а також Morais та співавт. [19] продемонстрували можливості розподілених сенсорних систем для контролю температури, редокс-потенціалу та вмісту розчиненого кисню під час витримки портвейнових вин типу Tawny у дубових бочках. Авторами встановлено значну варіабельність показників між окремими бочками, що безпосередньо впливає на швидкість окисно-відновних реакцій, еволюцію фенольного комплексу та колірні характеристики вин. Такі результати підтверджують багатофакторний харак-

тер процесів старіння та визначальну роль температури й доступу кисню у керуванні якістю продукції.

Вплив температури та окисного режиму на кінетику дозрівання портвейнових вин ґрунтовно досліджено Martins та співавт. [21], які із застосуванням багатопараметричного кінетичного моделювання показали, що утворення сотолону – ключової ароматичної сполуки, відповідальної за характерні горіхово-пряні тони витриманого портвейну, має виражений синергічний зв'язок з температурою та наявністю кисню. При цьому температура зберігання має значно сильніший вплив на вина, витримувані в ємностях з високою проникністю для кисню, ніж у пляшках з обмеженим газообміном.

Узагальнення літературних даних свідчить, що традиційна португальська технологія формування портвейнового стилю ґрунтується на тривалій багаторічній витримці в дубових бочках за помірних температур без застосування інтенсивних термічних впливів. Водночас результати сучасних досліджень переконливо свідчать про визначальну роль режимів отримання виноматеріалу, температури, кисню та контакту з деревиною при дозріванні вина. З огляду на це, поєднання технології, яка охоплює процес контрольованого нагрівання виноматеріалу з помірною кількістю кисню та застосування альтернативної витримки на дубовій щепі може розглядатися як перспективний шлях отримання спеціальних міцних вин портвейнового типу прискореним способом з високими органолептичними показниками. Саме необхідність наукового обґрунтування доцільності такої технологічної комбінації в умовах Одеського регіону й зумовила проведення даного дослідження.

На цій підставі нами була сформована трьохфакторна модель експерименту, що дозволяє встановити оптимальні комбінації технологічних прийомів для отримання високоякісного міцного вина спеціального типу, максимально наближеного до стилю витриманих портвейнів, але із суттєво зменшеною тривалістю виробництва в умовах Одеського регіону.

Згідно з прийнятою схемою, першим фактором, який аналізувався, був технологічний прийом спиртування мезги. Як умовний контроль – використовували технологічний прийом спиртування суслу. Обидва варіанти піддавали подрібненню та гребене-виділенню, після чого вносили чисту культуру дріжджів і проводили часткове підброджування мезги. При необхідних кондиціях в першому варіанті бродячу мезгу пресували і проводили спиртування суслу, що бродить (зазвичай у виробництві найчастіше практикується саме такий технологічний прийом, оскільки дає можливість мінімізувати втрати спирту при спиртуванні та більш точно розраховувати необхідну кількість спирту). Другий варіант – спиртували всю мезгу, що дає можливість отримати кращу екстракцію речовин із твердих частин винограду, але передбачає перевитрату спирту. Після цього у другому варіанті проводився настій спиртованої мезги протягом 1 місяць та її пресування. Спиртування суслу (або мезги) проводили з розрахунку отримання червоних міцних вин з наступними кондиціями: об'ємна частка етилового спирту 18%об.; масова концентрація цукрів 100 г/дм³. Далі освітлені молоді виноматеріали залишали у скляних балонах для проходження природного освітлення.

Після повного освітлення кожен із цих двох варіантів знов поділяли на два варіанти – в один вносили дубові чіпси (середнього обсмажування, кількість 2 г/дм³), в другий – відповідно, ні. Таким чином, другий фактор, який було проаналізовано – застосування альтернативної витримки.

Надалі кожен із цих (4-х) варіантів піддавали різному впливу теплової обробки. Їх знову розділили на 2 варіанти, перший з яких дозрівав з помірною кількістю кисню у скляному балоні без застосування додаткового теплового навантаження протягом року,

другий – попередньо поміщали в теплову шафу на 30 діб при температурі 45 °С, після чого вино також дозрівало протягом року в скляному балоні при температурі 12–20 °С. Тобто, третій фактор – теплова обробка виноматеріалів.

В результаті комбінування трьох факторів було отримано 8 варіантів виноматеріалів (табл. 1):

$M_0 C_0 H_0$ — спиртування сусли, без чіпсів, без нагріву.

$M_0 C_0 H_1$ — спиртування сусли, без чіпсів, + нагрів.

$M_0 C_1 H_0$ — спиртування сусли, + чіпси, без нагріву.

$M_0 C_1 H_1$ — спиртування сусли, + чіпси, + нагрів.

$M_1 C_0 H_0$ — спиртування мезги, без чіпсів, без нагріву.

$M_1 C_0 H_1$ — спиртування мезги, без чіпсів, + нагрів.

$M_1 C_1 H_0$ — спиртування мезги, + чіпси, без нагріву.

$M_1 C_1 H_1$ — спиртування мезги, + чіпси, + нагрів.

Таблиця 1 – Загальні фізико-хімічні властивості вин

№	Абревіатура схеми	Короткий опис техно- логічної схеми	Об'ємна частка етилово- го спирту	Масова концент- рація цук- рів	Масова концент- рація тит- рованих кислот	Масова концент- рація лет- ких кислот
		Одиниці вимірювань	%	г/дм ³	г/дм ³	г/дм ³
1	$M_0 C_0 H_0$	спиртування сусли, без чіпсів, без нагріву	18,1	103	5,2	0,36
2	$M_0 C_0 H_1$	спиртування сусли, без чіпсів, + нагрів	18,0	101	5,2	0,41
3	$M_0 C_1 H_0$	спиртування сусли, + чіпси, без нагріву	17,9	100	5,3	0,38
4	$M_0 C_1 H_1$	спиртування сусли, + чіпси, + нагрів	18,1	105	5,2	0,40
5	$M_1 C_0 H_0$	спиртування мезги, без чіпсів, без нагріву	18,1	96	5,3	0,37
6	$M_1 C_0 H_1$	спиртування мезги, без чіпсів, + нагрів	18,0	103	5,3	0,43
7	$M_1 C_1 H_0$	спиртування мезги, + чіпси, без нагріву	18,1	101	5,3	0,38
8	$M_1 C_1 H_1$	спиртування мезги, + чіпси, + нагрів	18,0	104	5,4	0,42

Як видно за таблиці 1, об'ємна частка етилового спирту во всіх зразках дорівнювала $18 \pm 0,1\%$; масова концентрація цукрів – 100 ± 5 г/дм³, масова концентрація титрованих кислот також суттєво не відрізнялась та во всіх зразках була в діапазоні 5,2–5,4 г/дм³. Щодо впливу технологічних варіацій на масову концентрацію летких кислот нами були виявлені певні закономірності: режим нагріву (H1) корелює зі збільшенням показника масової концентрації летких кислот у всіх відповідних парах порівняння (порівняння варіантів 1→2, 3→4, 5→6, 7→8). Найвищі значення показника спостеріга-

ються при комбінації спиртування мезги + нагрів (варіант 6 – 0,43 г/дм³), а також при М1 Ч1 Н1 (варіант №8 – 0,42 г/дм³). Очевидно, що під дією підвищеної температури (45 °С, 30 діб) спостерігаються кілька процесів, які сприяють підвищенню летких кислот у виноматеріалі – активізація хімічного гідролізу естерів та ацетильованих сполук, що приводить до утворення вільної оцтової кислоти, прискорення окисних перетворень (наприклад окиснення етанолу або побічних метаболітів) з утворенням оцтових або альдегідних проміжків. Але насправді різниця показника летких кислот від 0,36 до 0,43 г/дм³ є практично незначною з точки зору явної оцтової дефектності, хоч і в деякій мірі може посилити відчуття гостроти та знизити фруктовість; при комбінованих ефектах (високі феноли + підвищена летка кислотність) сприйняття може зміщуватись у бік «сухофруктових/марочних» ноток.

Крім основних показників якості вин згідно ДСТУ 4806 було проведено визначення масової концентрації фенольних речовин (табл. 2) та оптичних характеристик (табл. 3).

Таблиця 2 – Масова концентрація фенольних речовин вин

№	Абревіатура схеми	Короткий опис технологічної схеми	Масова концентрація фенольних речовин
		Одиниці вимірювань	г/дм ³
1	М ₀ Ч ₀ Н ₀	спиртування суслу, без чіпсів, без нагріву	2305
2	М ₀ Ч ₀ Н ₁	спиртування суслу, без чіпсів, + нагрів	2220
3	М ₀ Ч ₁ Н ₀	спиртування суслу, + чіпси, без нагріву	2535
4	М ₀ Ч ₁ Н ₁	спиртування суслу, + чіпси, + нагрів	2510
5	М ₁ Ч ₀ Н ₀	спиртування мезги, без чіпсів, без нагріву	2740
6	М ₁ Ч ₀ Н ₁	спиртування мезги, без чіпсів, + нагрів	2670
7	М ₁ Ч ₁ Н ₀	спиртування мезги, + чіпси, без нагріву	3000
8	М ₁ Ч ₁ Н ₁	спиртування мезги, + чіпси, + нагрів	2960

Як видно з таблиці 2, масова концентрація фенольних сполук у дослідних зразках знаходилась в межах 2220–3000 мг/дм³, що відповідає досить високому рівню фенольного потенціалу вин з сорту винограду Одеський чорний. Встановлені значення свідчать про суттєвий вплив технологічних факторів – типу спиртування, використання дубових чіпсів та теплової обробки – на інтенсивність екстрагування та подальшу стабільність фенольних речовин.

Аналіз впливу способу спиртування (сусло або мезги) показав, що виразне збільшення фенольної концентрації спостерігається при спиртуванні саме мезги, а не суслу. Масова концентрація фенольних речовин в зразках першого варіанту (спиртування сусла, без чіпсів, без нагріву) склала 2305 мг/дм³, що було на 15,9 % менше, ніж в варіанті 5 (спиртування мезги, без чіпсів, без нагріву). Якщо порівнювати зразки, 1–4 (спиртування суслу) зі зразками 5–8 (спиртування мезги), також помітка суттєва різниця. В зразках 1–4 масова концентрація фенольних сполук знаходилась в діапазоні 2220–2510 мг/дм³, а в зразках 5–8, відповідно, 2740–3000 мг/дм³. Це узгоджується з тим, що спирт у концентрації ~18 %об. є потужним екстрагентом, який активно вилучає поліфенольні сполуки зі шкірки мезги при прямому контакті з твердою фазою. Тому у варіантах зі спиртуванням суслу екстракція мінімальна, оскільки основний масив фенольних речовин залишається у відтиснутій меззі.

Наступним фактором впливу на фенольні речовини, які ми досліджували, було використання дубових чіпсів. Для цього проводилось порівняння двох пар: з використанням спиртування суслу (варіант 1 – без чіпсів та варіант 3 з внесенням чіпсів), та використанням спиртування мезги (варіант 5 – без чіпсів та варіант 7 з внесенням чіпсів). Згідно отриманих даних, показано, що додавання дубових чіпсів сприяло збільшенню загальної фенольної концентрації в обох схемах:

1 → 3: 2305 мг/дм³ → 2535 мг/дм³ (+230 мг/дм³);

5 → 7: 2740 мг/дм³ → 3000 мг/дм³ (+260 мг/дм³).

Відомо, що дубові матеріали середнього ступеня обсмаження (чіпси) містять елаготаніни, фенольні кислоти, лігнінові похідні. Їх перехід у вино пояснює підвищення показників. Ефект чіпсів більш виражений у варіантах зі спиртуванням мезги, оскільки висока концентрація спирту посилює екстракцію фенолів із дубу, наявність уже значного фенольного фону з мезги сприяє додатковому утворенню стабільних полімерних структур.

Третім фактором, вплив якого ми досліджували на зміст фенольних сполук, був вплив теплової обробки (30 діб, 45 °C). У всіх випадках термічний вплив приводив до незначного зниження концентрації фенольних сполук. Це добре узгоджується з відомими закономірностями, згідно з якими нагрівання викликає окиснення та часткове руйнування термолабільних фенольних компонентів (катехинів та, особливо, антоціанів), полімеризацію та осадження високомолекулярних комплексів.

Однак зниження є помірним, що свідчить про достатню стійкість фенольного комплексу портвейнових виноматеріалів у присутності спирту та за відносно короткої тривалості термічної експозиції.

Треба також зазначити динаміку змін концентрації фенольних сполук в парах без чіпсів:

1 → 2: 2305 мг/дм³ → 2220 мг/дм³ (зниження на 85 мг/дм³, або 3,7 %);

5 → 6: 2740 мг/дм³ → 2670 мг/дм³ (зниження на 70 мг/дм³, або 2,6 %);

та зміни в парах з чіпсами

3 → 4: 2535 мг/дм³ → 2510 мг/дм³ (зниження на 25 мг/дм³, або 1,0 %);

7 → 8: 3000 мг/дм³ → 2960 мг/дм³ (зниження на 40 мг/дм³, або 1,3 %).

Як можна побачити з наведених даних, при використуванні дубових чіпсів вплив теплової обробки на загальну кількість фенольних сполук зменшується з 2,6–3,7 % до 1–1,3 %.

Показано, що тепловий вплив дещо знижує показники масової концентрації фенольних сполук, але не змінює загальних закономірностей між групами.

Масова концентрація фенольних сполук у дослідних зразках показала чітку за-

лежність від умов технологічної обробки виноматеріалу. Основним фактором, що визначає рівень фенольності портвейнів із сорту Одеський чорний, є спосіб спиртування: пряме спиртування мезги забезпечило на 15–25 % вищу екстракцію фенольних речовин порівняно зі спиртуванням суслу. Дубові чіпси системно підвищували фенольну концентрацію внаслідок переходу дубильних компонентів у вино. Теплова обробка призвела до часткових втрат фенолів у межах 1–3,7 %, що відповідає термолабільності антоціанів і продуктів їх полімеризації. Найбільш насиченим за фенольним складом є варіант «спиртування мезги + дубові чіпси», який забезпечив максимальний екстрактивний потенціал та формування структурованого фенольного комплексу, характерного для портвейнів, наближених до стилю марочних вин тривалої витримки.

Оптичні властивості дослідних зразків червоних міцних вин типу портвейн характеризувалися комплексною залежністю від трьох технологічних факторів — способу спиртування, застосування дубових чіпсів та теплового навантаження (табл. 3).

Таблиця 3 – Оптичні характеристики вин

№	Технологічна схема	D ₄₂₀	D ₅₂₀	Інтенсивність фарбування (I)	Відтінок фарбування (Т)
M ₀ Ч ₀ Н ₀ / M ₀ Ч ₀ Н ₁					
1	спиртування суслу, без чіпсів, без нагріву	0,603	1,160	1,763	0,520
2	спиртування суслу, без чіпсів, + нагрів	0,630	1,100	1,730	0,573
M ₀ Ч ₁ Н ₀ / M ₀ Ч ₁ Н ₁					
3	спиртування суслу, + чіпси, без нагріву	0,620	1,168	1,788	0,531
4	спиртування суслу, + чіпси, + нагрів	0,650	1,110	1,760	0,586
M ₁ Ч ₀ Н ₀ / M ₁ Ч ₀ Н ₁					
5	спиртування мезги, без чіпсів, без нагріву	0,621	1,183	1,804	0,525
6	спиртування мезги, без чіпсів, + нагрів	0,664	1,153	1,817	0,576
M ₁ Ч ₁ Н ₀ / M ₁ Ч ₁ Н ₁					
7	спиртування мезги, + чіпси, без нагріву	0,634	1,182	1,816	0,537
8	спиртування мезги, + чіпси, + нагрів	0,670	1,131	1,801	0,592

Отримані результати свідчать про диференційований внесок кожного з факторів у формування інтенсивності забарвлення та його спектрального відтінку.

Вплив способу спиртування (спиртування суслу або мезги). Зразки, отримані шляхом спиртування мезги (варіанти 5–8), демонструють вищу інтенсивність забарвлення порівняно з відповідними зразками, де спиртування проводилося після пресуван-

ня сусла. Такі відмінності зумовлені більш повною екстракцією антоціанів та інших фенольних сполук зі шкірочки та насіння, що підтверджується збільшенням показників оптичної щільності D_{420} та D_{520} , а також інтегральної інтенсивності (І). якщо в варіантах зі спиртуванням суслу показник інтенсивності дорівнював 1,730–1,788, то в варіантах 5–8 (спиртування мезги) його значення збільшувалися до 1,804–1,817. Особливо це проявляється у варіантах 6–7, де інтенсивність досягає 1,816–1,817, що корелює з підвищеним фенольним потенціалом вин, спиртованих на меззі.

Вплив дубових чіпсів. Практично во всіх варіантах додавання дубових чіпсів сприяло зростанню оптичної щільності D_{420} , яка умовно відражає жовті компоненти кольору (D_{420}); приріст оптичної щільності при довжині хвилі 520 нм (червоний спектр) також був, але значно менш вираженим. Це узгоджується з відомим впливом дубу на поглинання в коротшій частині видимого спектра — екстракція елаготанінів, фенольних альдегідів та продуктів термічної деградації деревини посилює абсорбцію в області жовтих хвиль.

У порівнянні варіантів 1 (без чіпсів) і 3 (+чіпси) інтенсивність зростає від 1,763 до 1,788, переважно з допомогою збільшення величини D_{420} . Відтінок також незначно підвищується (0,520 → 0,531), що вказує на деяку зміну спектрального балансу вин у напрямку жовтих тонів.

У варіантах 7 та 8, де поєднані максимальна екстракція з мезги та вплив дубових чіпсів, інтенсивність залишається найвищою серед усіх зразків (1,801–1,816).

Вплив теплової обробки. Термічна дія (45 °С, 30 діб) у всіх випадках спричиняла: зменшенню D_{520} — наслідок часткової полімеризації та конденсації антоціанів; зростанню D_{420} — утворення жовтих та бурштинових полімерних пігментів; підвищення відтінку (Т) — ознака "старіння" кольору. Так, у варіантах 1 (спиртування суслу, без чіпсів, без нагріву) та 2 (спиртування суслу, без чіпсів, + нагрів) величина відтінку збільшувалась на 10,2 % ($T_1 \rightarrow T_2$: 0,520 → 0,573). Аналогічний ефект спостерігається у варіантах 4, 6 та 8 (0,586; 0,576; 0,592 відповідно). Зростання відтінку на 10–13 % відповідає розвитку окисно-полімеризаційних процесів, притаманних раннім етапам старіння вин в процесі портвейнізації.

Отримані результати дозволяють сформулювати кілька ключових закономірностей. Найвища інтенсивність забарвлення притаманна винам, спиртованим на меззі, особливо без нагрівання (варіанти 6–7). Але відомо, що нагрів з обмеженою кількістю кисню формують типічні «портвейнові» тони, тому, якщо технологія не передбачає багаторічну витримку в бочках, і перед технологом стоїть завдання протягом 1-2-х років отримати у вині яскравий виразний стиль портвейну, нагрівання абсолютно необхідне. Дубові чіпси забезпечують зростання жовтої компоненти, що відображено у підвищенні D_{420} та відтінку. Нагрівання стабільно спричиняє «тепліший» спектральний профіль (зростання Т) внаслідок деструкції частини антоціанів та формування полімерних пігментів.

Сенсорна оцінка опитних зразків проводилась групою експертів за 100-бальною шкалою. Були проаналізовані такі показники вин, як прозорість, колір, чистота букета, інтенсивність букета, якість букета, чистота смаку, інтенсивність смаку, післясмак, якість смаку і загальна гармонія.

Результати сенсорного аналізу дозволили констатувати, що поєднання технологічних факторів (спиртування суслу/мезги, використання дубових чіпсів та проведення теплової обробки) істотно впливає на формування кольорових, ароматичних та смакових характеристик, а також на загальну типовість отриманих вин як продуктів портвейнового стилю. Особливо важливо, що тепла обробка у всіх випадках сприяла ви-

разнішій типовості, формуванню тонів карамелізованих фруктів, сухофруктів та легких прянощів, що відобразилося у підвищенні загальних балів (рис. 1).

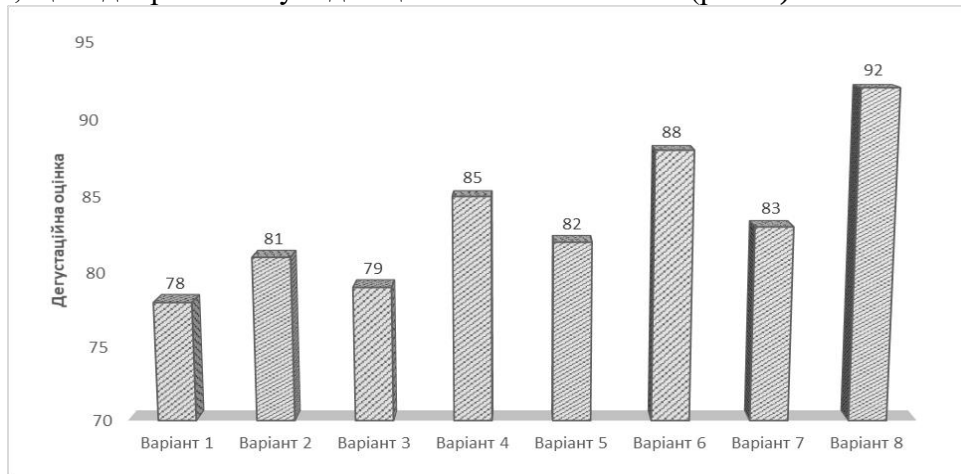


Рисунок 1 – Результати сенсорного аналізу за 100-бальною шкалою

Варіант 1 (сусло, без чіпсів, без нагріву) характеризувався чистим, середньої інтенсивності ароматом з домінуванням ягід чорної смородини та ожини, з незначним присмаком свіжої черешні. Смак м'який, рівний, але не досить структурний, з коротким післясмаком. Загальна оцінка – 78 бали, типовість портвейну виражена слабо.

Варіант 2 (сусло, без чіпсів, з нагрівом) демонстрував більш теплий колір та легкі портвейнові відтінки у букеті; відчувається печені ягоди, легкі тони сухих квітів, сушеної журавлини. Смак округліший, із ледь відчутними тонами карамелізованої сливи та легких прянощів. Нагрів посилив типовість портвейну, що відповідно підвищило сенсорну оцінку до 81 балів.

Варіант 3 (сусло, чіпси, без нагріву) мав інтенсивний рубіновий колір та виразний аромат, де поєднувались тони чорної смородини, ожини, ванілі та легких кокосових відтінків, характерних для дубових чіпсів середнього обсмаження. Смак став структурним, з відчутною, але гармонійною терпкістю і тривалішим післясмаком. Оцінка – 79 балів.

Варіант 4 (сусло, чіпси, нагрів) поєднав ноти витримки (ваніль, легкий тон кокосу та горіхів) із тепловими тонами (сухофрукти, інжир, карамелізований виноград). Букет найбільш комплексний серед варіантів із спиртуванням суслу. Смак повний, округлий, із гармонійним балансом фруктових тонів і відтінків витримки. Нагрів суттєво посилив типовість портвейну. Оцінка – 85 балів.

Варіант 5 (мезга, без чіпсів, без нагріву) відзначався високою інтенсивністю кольору та чистим, яскравим ароматом чорних ягід, сливи та легких квіткових тонів. Смак повний, з добре вираженою структурою, тривалим ягідно-пряним післясмаком. Оцінка – 82 балів, типовість середня.

Варіант 6 (мезга, без чіпсів, нагрів) демонстрував більш зрілий ароматичний профіль: до ягідних тонів додалися сухофрукти (родзинки, чорнослив), легкі пряні ноти (гвоздика, кориця). Смак став округлішим, теплішим, з виразною портвейнковою типовістю. Оцінка – 88 бали.

Варіант 7 (мезга, чіпси, без нагріву) характеризувався найвищою інтенсивністю кольору та надзвичайно виразним букетом – стиглі чорні ягоди, фіалка, ваніль, легкі горіхові та кокосові ноти, тонкі димні відтінки, але не вистачає типових портвейнових тонів. Смак дуже насичений, структурний, з тривалим, багат шаровим післясмаком. Оцінка – 83 бали.

Варіант 8 (мезга, чіпси, нагрів) мав найвищу загальну типичність червоного

портвейну. У букеті поєднувались сухофрукти (родзинки, інжир), печені ягоди, легкі десертні тони, ваніль, кокос, спеції та ледь відчутна димність. Смак максимально повний, округлий, танінно збалансований, з найдовшим післясмаком серед усіх зразків. Оцінка – 92 балів.

Поєднання трьох аспектів – спиртування мезги, нагріву вина при його дозріванні та контакту з дубовими чіпсами має синергетичний ефект. У варіантах 6–8 спостерігалися максимальні рівні фенольної екстракції (до 3000 мг/дм³), найбільша оптична інтенсивність, найбагатший ароматичний профіль (сухофрукти, печені ягоди, ваніль, кокос, прянощі, горіх, димність) та найповніший смак із тривалим післясмаком.

На підставі сумарних фізико-хімічних, оптичних та сенсорних показників нами встановлено, що найкращим варіантом є варіант 8, який отримав найвищу сенсорну оцінку. Саме він характеризувався максимальною портвейновою типовістю, найповнішим смаком, найтривалішим післясмаком та найрозвиненішим букетом із десертно-сухофруктовими й дубовими тонами, що дає підстави рекомендувати впровадження технології комплексного застосування нагріву, дубових чіпсів та спиртування мезги як оптимальної моделі для отримання високоякісних міцних вин спеціального портвейного типу із скороченим циклом виробництва.

Література

1. Pechko V., Kovalova I., Muliukina N., Lyashenko H., Belous I. Regional development of wine tourism in the context of climate change: the experience of the Odesa region. *Agricultural and Resource Economics: International Scientific E-Journal*. 2024. Vol. 10(3). Art. 06. DOI: <https://doi.org/10.51599/are.2024.10.03.06>.
2. Vlasov V., Lyashenko H., Buzovska M., Bulayeva Y., Popova H. et al. Assessment of condition of vineyards in Odesa Oblast according to Ukrainian Vineyard Cadastre Database. *Journal of Uman National University*. 2023. Issue 103. Part 1. P. 42–52. DOI: <https://doi.org/10.32782/2415-8240-2023-103-1-42-52>.
3. Tkachenko O., Trinkal O., Pashkovskiy A. The influence of agrometeorological conditions of the vegetation period on the technological properties of grapes. *Technology Audit and Production Reserves*. 2015. DOI: <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2015.44024>.
4. Tkachenko O., Pashkovskiy A., Shtirbu A. Influence of viticultural practices on the sensory characteristics of wine grape varieties. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.98423>.
5. Leeuwen C., Darriet P. The impact of climate change on viticulture and wine quality. *Journal of Wine Economics*. 2016. Vol. 11(1). P. 150–167.
6. Таїров О. Є., Герасименко В. Г., Ляшенко Г. М. Сорт винограду Одеський чорний: біологічні особливості та напрями технологічного використання. *Виноградарство і виноробство*. 2014. № 51. С. 42–47.
7. Ляшенко Г. М., Мулюкіна Н. А., Герасименко В. Г. Фенольний комплекс та забарвлюючі речовини вин із сорту винограду Одеський чорний. *Наукові праці Національного наукового центру «Інститут виноградарства і виноробства ім. В. Є. Таїрова»*. 2016. Вип. 43. С. 88–95.
8. Bakker J., Bridle P., Bellworthy T., Garcia-Viguera M., Reader H., Watkins S. J. Two methods of Port vinification: a comparison of changes during fermentation and of characteristics of the wines. *American Journal of Enology and Viticulture*. 1996.
9. Bakker J., Bridle P., Watkins S. J. Effect of enzymes during vinification on color and sensory properties of port wines. *American Journal of Enology and Viticulture*. 1999.
10. Cosme I., Morais A. R., Inácio J., Falcão A. C. Precision enology in Tawny Port wine aging process: monitoring barrel to barrel variation in oxygen, temperature and redox

potential. *Proceedings of the 42nd World Congress of Vine and Wine*. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1051/BIOCONF/20191502026>.

11. Palma N., Reis J. From convergence to divergence: Portuguese demography and economic growth. *GGDC Research Memorandum*. 2016. 1500–1850.

12. Brito C., Ramos J., Mota P., Ramos P. The port wine network. *Working Paper*. No. 70. Faculdade de Economia do Porto. 1997.

13. Ho P., Silva M. C. M., Hogg T. A. Effect of skin contact and oxygenation of musts on the composition of white port wines. *Sciences des Aliments*. 1999.

14. Palstra S. W. L., Meijer H. A. J. Verification of the age of 10- and 20-year-old Tawny Port wines using radiocarbon. *Food Chemistry*. 2024. Vol. 448.

15. Jackson R. S. *Wine science: principles and applications*. 5th ed. Academic Press. 2020.

16. Ho P., Silva M. C. M., Hogg T. A. Changes in colour and phenolic composition during the early stages of maturation of port in wood, stainless steel and glass. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 2001. Vol. 81(9). P. 811–818. DOI: <https://doi.org/10.1002/jsfa.938>.

17. Mateus N., de Freitas V. Evolution and stability of anthocyanin-derived pigments during Port wine aging. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2002. Vol. 50(7). P. 2110–2116. DOI: <https://doi.org/10.1021/jf0106547>.

18. Cosme F., Morais J., Jordão A. M. Monitoring oxygen, redox potential and temperature during Tawny Port wine ageing. *Food Chemistry*. 2017. Vol. 229. P. 601–609.

19. Morais J., Cosme F., Jordão A. M. Precision enology: monitoring oxidative aging of fortified wines. *OENO One*. 2018. Vol. 52(3). P. 241–252.

20. Martins R. C., Monforte A. R., Silva Ferreira A. C. Port wine oxidation management: a multiparametric kinetic approach. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2013. Vol. 61(22). P. 5371–5379. DOI: <https://doi.org/10.1021/jf4005109>.

Bibliography (transliterated)

1. Pechko V., Kovalova I., Muliukina N., Lyashenko H., Belous I. Regional development of wine tourism in the context of climate change: the experience of the Odesa region. *Agricultural and Resource Economics: International Scientific E-Journal*. 2024. Vol. 10(3). Art. 06. DOI: <https://doi.org/10.51599/are.2024.10.03.06>.

2. Vlasov V., Lyashenko H., Buzovska M., Bulayeva Y., Popova H. et al. Assessment of condition of vineyards in Odesa Oblast according to Ukrainian Vineyard Cadastre Database. *Journal of Uman National University*. 2023. Issue 103. Part 1. P. 42–52. DOI: <https://doi.org/10.32782/2415-8240-2023-103-1-42-52>.

3. Tkachenko O., Trinkal O., Pashkovskiy A. The influence of agrometeorological conditions of the vegetation period on the technological properties of grapes. *Technology Audit and Production Reserves*. 2015. DOI: <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2015.44024>.

4. Tkachenko O., Pashkovskiy A., Shtirbu A. Influence of viticultural practices on the sensory characteristics of wine grape varieties. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.98423>.

5. Leeuwen C., Darriet P. The impact of climate change on viticulture and wine quality. *Journal of Wine Economics*. 2016. Vol. 11(1). P. 150–167.

6. Tairov O. Ye., Herasymenko V. H., Liashenko H. M. Sort vynuohradu Odeskyi chornyi: biolohichni osoblyvosti ta napriamy tekhnolohichnoho vykorystannia. *Vynohradarstvo i vynorobstvo*. 2014. No. 51. P. 42–47.

7. Liashenko H. M., Muliukina N. A., Herasymenko V. H. Fenolnyi kompleks ta zabarvliuuchi rechovyny vyn iz sortu vynuohradu Odeskyi chornyi. *Naukovi pratsi Natsional-*

noho naukovo tse ntru «Instytut vynuhradars tva i vynuobstva im. V. Ye. Tairova». 2016. Vyp. 43. P. 88–95.

8. Bakker J., Bridle P., Bellworthy T., Garcia-Viguera M., Reader H., Watkins S. J. Two methods of Port vinification: a comparison of changes during fermentation and of characteristics of the wines. *American Journal of Enology and Viticulture*. 1996.

9. Bakker J., Bridle P., Watkins S. J. Effect of enzymes during vinification on color and sensory properties of port wines. *American Journal of Enology and Viticulture*. 1999.

10. Cosme I., Morais A. R., Inácio J., Falcão A. C. Precision enology in Tawny Port wine aging process: monitoring barrel to barrel variation in oxygen, temperature and redox potential. *Proceedings of the 42nd World Congress of Vine and Wine*. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1051/BIOCONF/20191502026>.

11. Palma N., Reis J. From convergence to divergence: Portuguese demography and economic growth. *GGDC Research Memorandum*. 2016. 1500–1850.

12. Brito C., Ramos J., Mota P., Ramos P. The port wine network. *Working Paper*. No. 70. Faculdade de Economia do Porto. 1997.

13. Ho P., Silva M. C. M., Hogg T. A. Effect of skin contact and oxygenation of musts on the composition of white port wines. *Sciences des Aliments*. 1999.

14. Palstra S. W. L., Meijer H. A. J. Verification of the age of 10- and 20-year-old Tawny Port wines using radiocarbon. *Food Chemistry*. 2024. Vol. 448.

15. Jackson R. S. Wine science: principles and applications. 5th ed. Academic Press. 2020.

16. Ho P., Silva M. C. M., Hogg T. A. Changes in colour and phenolic composition during the early stages of maturation of port in wood, stainless steel and glass. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 2001. Vol. 81(9). P. 811–818. DOI: <https://doi.org/10.1002/jsfa.938>.

17. Mateus N., de Freitas V. Evolution and stability of anthocyanin-derived pigments during Port wine aging. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2002. Vol. 50(7). P. 2110–2116. DOI: <https://doi.org/10.1021/jf0106547>.

18. Cosme F., Morais J., Jordão A. M. Monitoring oxygen, redox potential and temperature during Tawny Port wine ageing. *Food Chemistry*. 2017. Vol. 229. P. 601–609.

19. Morais J., Cosme F., Jordão A. M. Precision enology: monitoring oxidative aging of fortified wines. *OENO One*. 2018. Vol. 52(3). P. 241–252.

20. Martins R. C., Monforte A. R., Silva Ferreira A. C. Port wine oxidation management: a multiparametric kinetic approach. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2013. Vol. 61(22). P. 5371–5379. DOI: <https://doi.org/10.1021/jf4005109>.

УДК 663.252

О. Л. Ходаков, канд. техн. наук, доцент, Г. О. Саркісян, д-р екон. наук, професор,
О. В. Василик, канд. техн. наук, доцент, О. М. Мирошніченко, доцент,
Т. М. Афанасьєва, канд. техн. наук, доцент, Л. О. Ткаченко, ст. викладач,
І. Г. Ковальчук, магістр

ВИВЧЕННЯ ВПЛИВУ ТЕХНОЛОГІЇ НА ЯКІСТЬ ЧЕРВОНИХ МІЦНИХ ВИН СПЕЦІАЛЬНОГО ТИПУ (СТІЛЬ ПОРТВЕЙНУ) В УМОВАХ ОДЕСЬКОГО РЕГІОНУ

У статті наведено результати комплексного дослідження впливу технологічних чинників на формування якості червоних міцних вин спеціального типу портвейнового стилю, виготовлених в умовах Одеського регіону з використанням сорту винограду

Одеський чорний. Актуальність роботи зумовлена поєднанням кліматичних змін, що сприяють накопиченню високих концентрацій цукрів і фенольних сполук у винограді півдня України, та зростанням інтересу до виробництва спеціальних міцних вин з автохтонних і селекційних сортів, адаптованих до місцевого ґрунту.

Метою дослідження було наукове обґрунтування доцільності застосування вдосконаленої прискореної технології виробництва червоних міцних вин портвейнового типу в умовах Одеського регіону, а також оцінка впливу ключових технологічних прийомів на фізико-хімічні, фенольні, оптичні та органолептичні показники якості готової продукції. Зазначено, що дослідження не має на меті відтворення портвейну як захищеного географічного найменування походження, а спрямоване на створення стилістично наближених вин спеціального типу.

Експериментальні зразки були отримані на основі трьохфакторної моделі, яка включала спосіб спиртування (сусла або мезги), застосування альтернативної витримки з використанням дубових чіпсів середнього обсмаження та проведення теплової обробки виноматеріалів (45 °C протягом 30 діб) з подальшим дозріванням. Комбінування зазначених факторів дозволило сформувавши вісім технологічних варіантів виноматеріалів, які після освітлення та дозрівання були проаналізовані за основними показниками якості відповідно до вимог чинних нормативних документів, а також за вмістом фенольних речовин, оптичними характеристиками та сенсорними властивостями. Встановлено закономірності впливу кожного з цих факторів на формування якісних показників вин. Оптичні характеристики вин чітко корелювали з фенольним складом і режимами технологічної обробки. Встановлені також закономірності впливу технологічних особливостей та складу вин на їх сенсорну оцінку. За сукупністю фізико-хімічних, фенольних, оптичних та органолептичних показників оптимальним визнано варіант із поєднанням спиртування мезги, альтернативної витримки на дубових чіпсах та теплової обробки виноматеріалу. Отримані результати свідчать про високу перспективність застосування прискорених технологічних схем для виробництва червоних міцних вин спеціального типу портвейнового стилю з сорту Одеський чорний в умовах Одеського регіону та створюють наукове підґрунтя для їх подальшого впровадження у виробничу практику.

Ключові слова: технологія, якість, червоне міцне вино спеціального типу, портвейн, регіон, Одеський чорний (Аліберне).

O. L. Khodakov, G. O. Sarkisian, O. V. Vasylyk, O. M. Myroshnichenko, T. M. Afanasieva,
L. O. Tkachenko, I. H. Kovalchuk

STUDY OF THE TECHNOLOGY'S INFLUENCE ON THE QUALITY OF RED FORTIFIED WINES OF A SPECIAL TYPE (PORT-STYLE) IN THE ODESSA REGION

The article presents the results of a comprehensive study on the influence of technological factors on the formation of quality characteristics of red fortified wines of a special Port-style type produced under the conditions of the Odesa region using the Alibernet grape variety. The relevance of the study is determined by the combined effect of climate change, which contributes to the accumulation of high concentrations of sugars and phenolic compounds in grapes grown in southern Ukraine, and the growing interest in the production of special fortified wines from autochthonous and bred grape varieties adapted to the local terroir.

The aim of the research was to scientifically substantiate the feasibility of applying an improved accelerated technology for the production of red fortified wines of the Port type under the conditions of the Odesa region, as well as to evaluate the impact of key technological practices on the physicochemical, phenolic, optical, and organoleptic quality indicators of the

finished product. It is emphasized that the study does not aim to reproduce Port wine as a protected geographical indication, but rather focuses on the development of stylistically similar wines of a special type.

Experimental samples were obtained based on a three-factor model that included the method of fortification (of must or pomace), the application of alternative aging using medium-toast oak chips, and thermal treatment of wine materials (45 °C for 30 days) followed by maturation. The combination of these factors made it possible to form eight technological variants of wine materials which, after clarification and maturation, were analyzed according to the main quality parameters in compliance with current regulatory requirements, as well as for phenolic content, optical characteristics, and sensory properties. The regularities of the influence of each factor on the formation of wine quality indicators were established.

The optical characteristics of the wines showed a clear correlation with phenolic composition and technological processing regimes. Regular patterns of the influence of technological features and wine composition on sensory evaluation were also identified. Based on the overall set of physicochemical, phenolic, optical, and organoleptic parameters, the optimal variant was determined to be the combination of pomace fortification, alternative aging on oak chips, and thermal treatment of the wine material. The obtained results demonstrate the high potential of accelerated technological schemes for the production of red fortified wines of a special Port-style type from the Alibernet grape variety under the conditions of the Odesa region and provide a scientific basis for their further implementation in winemaking practice.

Keywords: technology, quality, red fortified wine of special type, Port-style wine, region, Alibernet.

Отримано редколегією 26.01.2026

Ходаков Олексій Леонідович (Oleksii Khodakov), канд. техн. наук, доцент Одеського національного технологічного університету, <https://orcid.org/0000-0002-6564-2552>;

Саркісян Ганна Овсенівна (Ganna Sarkisian), д-р екон. наук, професор Одеського національного технологічного університету, <https://orcid.org/0000-0001-7362-3637>;

Василик Олександр Васильович (Oleksandr Vasylyk), канд. техн. наук, доцент Одеського національного технологічного університету, <https://orcid.org/0000-0002-0546-4141>;

Мирошніченко Олена Михайлівна (Olena Myroshnichenko), канд. техн. наук, доцент Одеського національного технологічного університету, <https://orcid.org/0000-0002-7376-8008>;

Афанасьєва Тетяна Миколаївна (Tetiana Afanasieva), канд. техн. наук, доцент Одеського національного технологічного університету, <https://orcid.org/0000-0003-2791-0779>;

Ткаченко Людмила Олексіївна (Lyudmila Tkachenko), ст. викладач Одеського національного технологічного університету, <https://orcid.org/0000-0003-2607-0384>;

Ковальчук Іван Георгійович (Ivan Kovalchuk), магістр Одеського національного технологічного університету, <https://orcid.org/0009-0009-0484-4087>.

Н. О. Кануннікова, д-р філософії, ст. наук. співроб., О. В. Шестопапов, канд. техн. наук, професор, А. О. Сакун, д-р філософії, доцент,
А. С. Босюк, д-р філософії, старший викладач, О. В. Матющенко, аспірант

ЕКОЛОГІЧНІ НАСЛІДКИ КОРОЗІЇ У КОНТУРАХ ВВЕР-1000 ТА ПІДХОДИ ДО ЇХ МІНІМІЗАЦІЇ

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

Ключові слова: ВВЕР-1000, екологічна безпека, корозія, оксидні плівки, корозійні продукти, теплоносії, водяна пара, перегрів.

Вступ. Екологічна безпека атомної енергетики визначається не лише системами радіаційного контролю та бар'єрною концепцією захисту, але й матеріалознавчими процесами, які в довгостроковій перспективі здатні модифікувати експлуатаційні умови, підвищувати частоту регламентних технологічних операцій і, як наслідок, збільшувати обсяги вторинних відходів. Корозія обладнання в середовищах теплоносіїв є одним з таких процесів, оскільки супроводжується утворенням корозійних продуктів, їх переносом по контуру, депозицією у вигляді відкладень та необхідністю їх видалення з технологічних середовищ (очищення, фільтрація, сорбція). У результаті зростає навантаження на системи водопідготовки та очищення, а під час ремонтів і промивок формуються додаткові потоки забруднених вод, фільтрувальних матеріалів та шламів, що потребують регламентованого поводження.

На рис. 1 представлено послідовну блок-схему утворення та накопичення відходів у системі охолодження/очищення контуру (ланцюг відходоутворення) від вихідного металевих матеріалу до твердих радіоактивно забруднених відходів (шламів).

Процес починається з вихідного матеріалу (металу), який циркулює в трубопроводах/контурі. Під впливом корозійних процесів продукти корозії мігрують по контуру, накопичуються та осідають на поверхнях, що призводить до необхідності періодичного видалення забруднень за допомогою фільтрів або сепараторів. Видалені тверді частинки (шлами) збираються у спеціальні ємності (бочки) як тверді радіоактивно забруднені відходи. Паралельно в системі утворюються дві основні екологічні загрози:

1. у першому контурі – накопичення радіоактивно забруднених сорбентів;
2. у другому контурі – генерація хімічно забруднених стоків після проведення хімічних промивок.

Критичний перегрів (температури до 1200 °C) суттєво прискорює деградацію конструкційних матеріалів через різке зростання швидкості окиснення, що призводить до втрати бар'єрних властивостей покриттів та додаткового накопичення продуктів розпаду.

Для оцінки ефективності та екологічної безпеки системи застосовуються такі проксі-показники як: маса видалених шламів; частота проведення хімічних промивок; обсяг використаних реагентів.

Як шлях до мінімізації утворення вторинних відходів запропоновано використання захисних шарів на основі оксиду хрому, які стабілізують поверхню, знижують мобільність продуктів корозії, зменшують інтенсивність деградації матеріалів та, відповідно, скорочують обсяги утворюваних твердих і рідких радіоактивних відходів.



Рисунок 1 – Схема утворення, міграції та вилучення корозійних продуктів

Для установок ВВЕР-1000 принципово важливим є розділення умов корозійної взаємодії між першим і другим контурами. Перший контур характеризується підвищеними температурою та тиском теплоносія і виконує критичну бар'єрну функцію щодо ізоляції потенційно радіоактивних середовищ. Другий контур працює за нижчих параметрів, проте корозійні процеси й відкладення в ньому впливають на ефективність теплообміну, частоту очищень і обсяг технологічних відходів. Додатковий аспект проблеми проявляється у сценаріях перегріву, коли в середовищі водяної пари швидкість окиснення і деградація захисних шарів можуть різко зростати, підвищуючи ризики втрати бар'єрних властивостей матеріалів та обсягів продуктів окиснення, що підлягають подальшому поводженню.

Метою роботи є узагальнення сучасних уявлень про механізми корозії та стабільність оксидних плівок у системах ВВЕР-1000, аналіз екологічних наслідків утворення й міграції корозійних продуктів, а також огляд технічних і організаційних підходів, релевантних для зниження відходоутворення та технологічних скидів.

Здійснено огляд літератури за трьома тематичними кластерами: (i) перенос корозійних продуктів і контамінація первинного контуру; (ii) корозія, відкладення та хімічні промивки у вторинному контурі і парогенераторах; (iii) високотемпературне окиснення у водяній парі (до 1200 °C) та покриття бар'єрного типу. Акцент зроблено на механізмах, що визначають мобільність корозійних продуктів, та на екологічних проксі-показниках (частота промивок, маса вилучених відкладень, обсяг промивних середовищ і витратних матеріалів).

Обговорення результатів. Екологічні наслідки корозії у водоохолоджуваних реакторних системах детермінуються утворенням і переносом корозійних продуктів у розчиненій, колоїдній і частинковій фракціях. Для первинного контуру ключовими є механізми депозиції частинок і поверхневі процеси розчинення-осадження, які використовуються для прогнозу накопичення відкладень та контамінації поверхонь [1–4]. Для вторинного контуру вирішальним є формування відкладень у парогенераторах і на теплообмінних поверхнях та пов’язані з ними режими хімічних промивок [5–7].

Для прикладної екологічної інтерпретації пропонується використовувати проксі-показники: (i) масовий потік корозійних продуктів до систем очищення; (ii) інтенсивність депозиції/реосадження та приріст відкладень; (iii) частота промивок і витрати реагентів; (iv) маса вилучених шламів, фільтрів і сорбентів, що переходять у відходи.

На рис. 2 представлено ланцюг формування вторинних радіоактивних відходів у системі охолодження ядерного реактора, з акцентом на процеси в першому та другому контурах, вплив режиму перегріву та механізм захисту поверхонь за допомогою хромвмісних покриттів.

Процес починається з корозії конструкційних матеріалів у теплоносії, що призводить до утворення продуктів корозії. Такі продукти переносяться потоком теплоносія (перенос), осідають (відкладення) на поверхнях обладнання, після чого вилучаються під час очищення (фільтрація, хімічні промивки тощо). У результаті формуються тверді шлами та забруднені стоки, які накопичуються як вторинні радіоактивні відходи.



Рисунок 2 – Ланцюг формування вторинних відходів

Як видно з рис. 2 у першому контурі (реакторний контур) відбувається накопичення твердих радіоактивно активованих відходів: продукти корозії осідають на фільтрах, сорбуються та активуються в зоні нейтронного потоку, утворюючи радіоактивні матеріали, придатні для захоронення, що призводить до поступового збільшення обсягу твердих відходів. У другому контурі (парогенератор та вторинний цикл) переважає хімічне забруднення стоків – часті хімічні промивки генерують агресивні технологічні стоки з високим вмістом реагентів, які потребують спеціальної обробки та утилізації.

Критичний фактор деградації – режим перегріву (температури до 1200 °C): при таких температурах швидкість окиснення матеріалів різко зростає, що спричиняє швидку деградацію захисних бар'єрів (оксидних плівок), втрату їхньої цілісності та додаткове утворення продуктів корозії. Для мінімізації утворення вторинних відходів запропоновано застосування захисних хромвмісних покриттів: такі шари стабілізують поверхню металу, значно знижують мобільність продуктів корозії, уповільнюють процеси окиснення та деградації, що в підсумку зменшує обсяги як твердих шламів, так і хімічно забруднених стоків. Головний екологічний показник навантаження визначається масою вилучених відходів та частотою проведення хімічних промивок обладнання.

Для переходу від концептуальної до прикладної екологічної оцінки проксі-показники доцільно нормувати та фіксувати у вигляді балансових величин за експлуатаційний інтервал (кампанія/рік/ремонтний цикл) з прив'язкою до виробітку (МВт·год) або тривалості роботи. Масовий потік корозійних продуктів до систем очищення може оцінюватися за матеріальним балансом вилучених твердих фаз (фільтрувальні елементи, сорбенти, шлами) з урахуванням їх маси та, за наявності даних, елементного складу/вмісту оксидної фази. Інтенсивність депозиції/реосадження доцільно інтерпретувати через приріст маси відкладень (перед-/післяремонтні дані, результати очищення теплообмінних поверхонь) і частоту переходу до режимів очищення. Частота промивок та витрати реагентів є прямими індикаторами екологічного навантаження, оскільки визначають обсяг промивних середовищ і склад технологічних стоків. Маса вилучених шламів, фільтрів і сорбентів відображає «кінцеву» стадію ланцюга «корозія → перенос → очищення» та може використовуватися як інтегральний показник корозійно-індукованого відходоутворення при порівнянні альтернативних стратегій водно-хімічного режиму, очищення та поверхневих рішень.

Оксидні плівки контролюють не лише кінетику корозії, але й фазово-дисперсний стан та мобільність продуктів деградації. У літературі виділяють три базові механізми, що керують вторинними потоками: розчинення/перепасивація з утворенням мобільної розчиненої фракції; відшарування/сколювання з переходом продуктів у частинкову фракцію; реосадження у вигляді відкладень при зміні термодинамічних умов [2–4, 6].

З екологічної точки зору ці механізми важливі тим, що визначають інтенсивність вилучення продуктів корозії системами очищення та частоту промивок, формуючи вторинні потоки промивних середовищ, шламів і витратних матеріалів. Окремо підкреслюється роль підходів до видалення відкладень у перехідних режимах, що підсилює значущість керування мобільністю корозійних продуктів [6].

Перший контур ВВЕР-1000 характеризується підвищеними температурою і тиском теплоносія (орієнтовно 16,5 МПа; 350 °C), тому опис переносу корозійних продуктів базується на поєднанні моделей частинкової депозиції та процесів розчинення-осадження (табл. 1). Оглядові роботи демонструють зв'язок між транспортом корозійних продуктів і наростанням контамінації поверхонь у водоохолоджуваних реакторах [1, 2].

Таблиця 1 – Екологічні аспекти корозії та показники експлуатації на контурі ВВЕР-1000

Технологічний контур	Параметри середовища	Ключові механізми	Екологічні наслідки
Перший контур ВВЕР-1000	Тиск $\approx 15,7$ – $16,5$ МПа; Температура ≈ 290 – 350 °C	Розчинення-осадження, контамінація поверхонь, частинкова депозиція	Акумуляція продуктів корозії, контамінація поверхонь (^{60}Co); відходи: відпрацьовані сорбенти, фільтрувальні матеріали, шлами
Другий контур ВВЕР-1000	Тиск $\approx 6,4$ МПа; Температура ≈ 280 °C	Формування відкладень на теплообмінних поверхнях, забивання рециркуляційних парогенераторів	Погіршення теплопередачі; відпрацьовані промивні розчини (реагенти), технологічні стоки
Режим високо-температурного перегріву	Водяна пара; Температура до 1200 °C і вище	Прискорене окиснення цирконієвих сплавів, кінетичні переходи, відшарування та сколювання оксидних шарів	Швидке накопичення продуктів деградації, зміна морфології оксидів, складність локалізації та поводження з продуктами

Моделювання депозиції частинок у первинному контурі (зокрема, в рамках OSCAR-подібних підходів) дозволяє кількісно пов'язати умови потоку з імовірністю осадження та накопиченням відкладень [3]. Моделювання uptake активованих продуктів (наприклад, Co-60) на конструкційних матеріалах/сплавах підкреслює роль поверхневих процесів розчинення-осадження у формуванні контамінації [4]. Практичний наслідок для екологічної оцінки – можливість інтерпретувати зниження мобільності корозійних продуктів як шлях зменшення маси вилучених продуктів системами очищення та обсягу витратних матеріалів.

Разом з тим, застосування OSCAR-подібних підходів у прикладній екологічній постановці має принципові обмеження. По-перше, невизначеність розподілу корозійних продуктів між розчищеною, колоїдною та частинковою фракціями істотно впливає на прогноз депозиції та ефективність вилучення в системах очищення; це створює чутливість результатів до вихідних припущень щодо дисперсності й агрегативної стабільності частинок. По-друге, локальні термогідрравлічні умови (зони змішаного кипіння/турбулентності, градієнти температури, ділянки зі зниженою швидкістю потоку) можуть формувати «гарячі точки» відкладення, які погано описуються усередненими параметрами. По-третє, моделі uptake/контамінації поверхонь суттєво залежать від опису поверхнево-хімічних стадій розчинення-осадження та стану оксидних плівок; за відсутності валідації на конкретних експлуатаційних даних інтерпретацію результатів доцільно обмежувати якісними трендами (напрямами зміни мобільності/депозиції), а не абсолютними величинами.

ВВЕР-специфічний аспект пов'язаний з оптимізацією водно-хімічного режиму первинного контуру, який розглядається як інструмент керування переносом і вторин-

ним відкладенням корозійних продуктів [8]. У контексті ВВЕР-1000 принциповим є те, що екологічно значущі «вторинні потоки» формуються не лише величиною корозійної швидкості, а й режимами підтримання хімічної стабільності теплоносія та ефективністю вилучення продуктів корозії із циркуляції. Тому при перенесенні узагальнених PWR-моделей транспорту необхідно відокремлювати універсальні механізми (частинкова депозиція, розчинення-осадження, перехід між фракціями) від параметрів, що визначаються конкретно практикою водно-хімічного режиму та очищення на ВВЕР-1000. З прикладної точки зору це означає, що порівняння екологічного ефекту різних підходів (зміна режиму, поверхневі рішення, оптимізація очищення) слід проводити не за «корозійною швидкістю» як такою, а за зміною мобільності корозійних продуктів, їх акумуляцією у системах очищення та частотою переходу до промивок/ремонтних очищень як подій, що генерують стоки й відходи.

У вторинному контурі ВВЕР-1000 (орієнтовно 6,4 МПа; 280 °С) екологічно критичним механізмом виступає накопичення відкладень на теплообмінних поверхнях і в парогенераторах, що погіршує теплопередачу і провокує застосування хімічних промивок. Критичні огляди систематизують чинники, які визначають склад і морфологію відкладень та їх вплив на режими обслуговування [5].

Проблема забивання/засмічення рециркуляційних парогенераторів відкладеннями розглядається як окремий клас відмов, для якого наведено механістичні пояснення та підходи до контролю [6]. Порівняння превентивних і «лікувальних» хімічних очищень демонструє, що стратегія промивок впливає на структуру магнетитових відкладень і сумарні потоки промивних середовищ [7]. З позицій екологічного менеджменту це означає, що частота промивок, витрати реагентів і маса шламів мають виступати базовими показниками оцінки.

Вторинні потоки, пов'язані з корозійно-індукованими очищеннями, доцільно розглядати як окремий об'єкт екологічної оптимізації, оскільки вони формують основну «матеріальну» частину навантаження: промивні середовища з реагентами, тверді фази (магнетитові шлами та відкладення), а також витратні матеріали систем очищення (фільтрувальні елементи, сорбенти/іонообмінні матеріали). Відмінність цих потоків полягає не лише у масі/обсязі, а й у складності поводження, яка зростає із підвищенням дисперсності твердих фаз та їх здатності до повторного переносу і вторинного осадження. Саме тому технологічні рішення, що зменшують мобільність продуктів корозії та їх схильність до реосадження, потенційно знижують сумарні обсяги промивок і масу вилучених твердих фаз, тобто дають екологічний ефект, який можна відстежувати через запропоновані проксі-показники.

Високотемпературне окиснення у водяній парі (до 1200 °С) відрізняється від корозії у водному теплоносії за кінетикою росту оксидів і характером деградації бар'єрних шарів. Огляд корозії цирконієвих сплавів, що застосовуються у паливних оболонках, підкреслює роль температури та парового середовища у прискоренні окиснення та зміні механізмів руйнування [10].

Для хромвісних бар'єрних систем описано кінетичні переходи та механізми відмови покриттів при окисненні у парі при 1200 °С і вище, що дозволяє інтерпретувати стабільність покриття як фактор, який впливає на масу і морфологію продуктів деградації [11–15]. В оглядовому екологічному контексті це доцільно пов'язувати з потенційною складністю локалізації та поводження з продуктами окиснення при перегріві.

Мінімізація екологічних наслідків корозії потребує поєднання: (і) керування водно-хімічним режимом для зниження мобільності корозійних продуктів та інтенсив-

ності реосадження; (ii) матеріалознавчих і поверхневих рішень для стабілізації оксидних шарів; (iii) оптимізації очищення і промивок з позицій зменшення обсягів реагентів, промивних середовищ і шламів. Для вторинного контуру стратегія промивок (превентивні проти лікувальних) безпосередньо впливає на сумарні стоки [7].

Хромвмісні покриття доцільно розглядати як перспективні бар'єрні системи для підвищення термохімічної стабільності поверхні та зменшення інтенсивності утворення і переносу продуктів деградації. Узагальнено дані щодо поведінки хромвмісних покриттів на нержавіючих сталях при паровому окисненні, включно з режимами 1200 °C, а також наведено аналіз механізмів відмови та кінетики процесів [11–20]. Водночас покриття бар'єрного типу не слід розглядати як універсальну заміну керуванню воднохімічним режимом та оптимізації очищення. Їх ефективність в експлуатаційній логіці визначається сукупністю факторів: адгезією і дефектністю шару, стабільністю у довготривалих водних режимах, стійкістю до термомеханічних впливів, а також тим, чи змінюють вони саме «мобільність» продуктів корозії (розчинені/колоїдні/частинкові форми) і схильність до депозиції. Тому екологічно коректне обґрунтування доцільності покриттів має виконуватися у зв'язі з іншими важелями мінімізації: порівнянням стратегій промивок (превентивні/лікувальні), умов формування відкладень та режимів очищення, а критерієм успішності має бути не лише зниження швидкості окиснення/корозії, а й статистично значиме зменшення проксі-показників (частоти промивок, витрат реагентів, маси вилучених шламів і витратних матеріалів) [21, 22].

Екологічна ефективність такого підходу в оглядовій постановці має оцінюватися через вплив на проксі-показники: зменшення мобільності корозійних продуктів у водних режимах, зниження схильності до депозиції/реосадження та, у високотемпературних режимах, через обмеження швидкості накопичення продуктів окиснення і потенційної дисперсності фази деградації.

Висновки. Екологічний ефект корозії у ВВЕР-1000 проявляється насамперед через утворення/перенос корозійних продуктів і пов'язані з цим очищення, промивки та вторинні потоки відходів і стоків. Стабільність оксидних плівок визначає мобільність корозійних продуктів (розчинення, відшарування, реосадження) і, відповідно, інтенсивність відкладення та потребу в промивках. Для першого контуру ($\approx 16,5$ МПа; 350 °C) екологічно релевантними є процеси депозиції/контамінації та накопичення продуктів корозії у системах очищення й відкладення. Для другого контуру ($\approx 6,4$ МПа; 280 °C) ключовим є вплив відкладень у парогенераторах і на теплообмінних поверхнях на частоту хімічних промивок і обсяги промивних середовищ та шламів. У режимах перегріву окиснення у водяній парі до 1200 °C може супроводжуватися прискореним накопиченням продуктів деградації та зміною їх морфології, що впливає на складність локалізації та поводження. Хромвмісні покриття є перспективним бар'єрним підходом для зниження мобільності продуктів корозії та потенційного зменшення корозійно-індукованого відходоутворення; їх доцільно оцінювати через проксі-показники переносу, відкладення і частоти промивок.

Література

1. Burrill K. A. Corrosion product transport in water-cooled nuclear reactors Part I Pressurized water operation. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*. 1977. No. 55(1). P. 54–61. DOI: <https://doi.org/10.1002/cjce.5450550110>.

2. Lin C. C. A review of corrosion product transport and radiation field buildup in boiling water reactors. *Progress in Nuclear Energy*. 2009. No. 51(2). P. 207–224. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2008.05.005>.
3. Cherpin C., Dacquait F. Modeling particle deposition in the primary circuit of pressurized water reactors for the OSCAR code. *Annals of Nuclear Energy*. 2024. No. 199. 110364. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2024.110364>.
4. Dacquait F., Francescatto J., Tévisse E., Genin J.-B., You D., Cherpin C., Broutin F. Simulation of Co-60 uptake on stainless steel and alloy 690 using the OSCAR v1.4 code integrating an advanced dissolution-precipitation model. *Nuclear Engineering and Design*. 2023. No. 405. 112190. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2023.112190>.
5. Xie Y., Zhang J. Corrosion and deposition on the secondary circuit of steam generators A critical review. *Journal of Nuclear Science and Technology*. 2016. No. 53(10). P. 1455–1466. DOI: <https://doi.org/10.1080/00223131.2016.1152923>.
6. Yang G., Pointeau V., Tévisse E., Chagnes A. A review on clogging of recirculating steam generators in Pressurized-Water Reactors. *Progress in Nuclear Energy*. 2017. No. 97. P. 182–196. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2017.01.010>.
7. Goujon C., Pauporté T., Bescond A., Mansour C., Delaunay S., Bretelle J.-L. Effects of curative and preventive chemical cleaning processes on fouled steam generator tubes in nuclear power plants. *Nuclear Engineering and Design*. 2017. No. 323. P. 120–132. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2017.07.022>.
8. Jeon S.-H., Song G. D., Hur D. H. Micro-Galvanic Corrosion of Steam Generator Materials within Pores of Magnetite Flakes in Alkaline Solutions. *Metals*. 2018. No. 8(11). 899. DOI: <https://doi.org/10.3390/met8110899>.
9. Hur D. H., Song G. D., Jeon S.-H., Lee H.-J. On the Use of NaOH Solution to Simulate the Crevice Conditions of a Nuclear Steam Generator. *Materials*. 2022. No. 15(23). 8471. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma15238471>.
10. Motta A. T., Couet A., Comstock R. J. Corrosion of zirconium alloys used for nuclear fuel cladding. *Annual Review of Materials Research*. 2015. No. 45(1). P. 311–343. DOI: <https://doi.org/10.1146/annurev-matsci-070214-020951>.
11. Ma H.-B., Yan J., Zhao Y.-H., Liu T., Ren Q.-S., Liao Y.-H., Zuo J.-D., Liu G., Yao M.-Y. Oxidation behavior of Cr-coated zirconium alloy cladding in high-temperature steam above 1200 °C. *npj Materials Degradation*. 2021. No. 5. 7. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41529-021-00155-8>.
12. Deng J., Geng D., Sun Q., Song Z., Sun J. Steam oxidation of Cr-coated zirconium alloy claddings at 1200 °C Kinetics transition and failure mechanism of Cr coatings. *Journal of Nuclear Materials*. 2023. No. 586. 154684. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2023.154684>.
13. Brachet J.-C., Rouesne E., Ribis J., Urvoy S., et al. High temperature steam oxidation of chromium-coated zirconium-based alloys Kinetics and process. *Corrosion Science*. 2020. No. 167. 108537. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2020.108537>.
14. Han X.-C., Xue J.-X., Peng S.-M., Zhang H.-B. An interesting oxidation phenomenon of Cr coatings on Zry-4 substrates in high temperature steam environment. *Corrosion Science*. 2019. No. 156. P. 117–124. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2019.05.017>.
15. Brachet J.-C., Le Saux M., Bischoff J., Palancher H., Chosson R., et al. Evaluation of Equivalent Cladding Reacted parameters of Cr-coated claddings oxidized in steam at 1200 °C in relation with oxygen diffusion/partitioning and post-quench ductility. *Journal of Nuclear Materials*. 2020. No. 533. 152106. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2020.152106>.

16. Li Z., Wang X., Chen H., Zhang R., Wei T., Yao L., Wang P. Review on performance of chromium-coated zirconium and its failure mechanisms. *Frontiers in Nuclear Engineering*. 2023. No. 2. 1212351. DOI: <https://doi.org/10.3389/fnuen.2023.1212351>.
17. Tang Y., Liao J., Yun D. Understanding the high-temperature corrosion behavior of zirconium alloys. *Frontiers in Materials*. 2024. No. 11. 1381818. DOI: <https://doi.org/10.3389/fmats.2024.1381818>.
18. Chen L., et al. Microstructure and high-temperature oxidation behaviour of anti-oxidation coating on zirconium alloys: An overview. *International Journal of Damage Mechanics*. 2024. (online). DOI: <https://doi.org/10.1177/02670844231214692>.
19. Trivedi K., Rane R., Mandapaka K. K., Lamba T. K., Joseph A., Roychowdhury S. High-Temperature and High-Pressure Steam Oxidation Behavior of TiN Coating Developed on Zircaloy-4 using Cylindrical Magnetron Sputtering Role of Thickness and Microstructure. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2025. No. 34(21). P. 24980–24996. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11665-025-11718-0>.
20. He H., Liu Y., Wang S., Zhang T., Chai X., Liu X. Review on corrosion-related unidentified deposit of pressurized water reactors. *Nuclear Engineering and Design*. 2025. No. 441. 114095. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2025.114095>.
21. Shtefan V. V., Kanunnikova N. A. Oxidation of AISI 304 steel in Al- and Ti-containing solutions. *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*. 2020. No. 56. P. 379. DOI: <https://doi.org/10.1134/S2070205120020239>.
22. Shtefan V., Kanunnikova N., Zuyok V. Comparative evaluation of microstructure and electrochemical, high-temperature corrosion rates of titanium- and aluminum-modified black chromium coatings on AISI 304 stainless steel. *Surface and Coatings Technology*. 2025. No. 497. 131706. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2024.131706>.

Bibliography (transliterated)

1. Burrill K. A. Corrosion product transport in water-cooled nuclear reactors Part I Pressurized water operation. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*. 1977. No. 55(1). P. 54–61. DOI: <https://doi.org/10.1002/cjce.5450550110>.
2. Lin C. C. A review of corrosion product transport and radiation field buildup in boiling water reactors. *Progress in Nuclear Energy*. 2009. No. 51(2). P. 207–224. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2008.05.005>.
3. Cherpin C., Dacquait F. Modeling particle deposition in the primary circuit of pressurized water reactors for the OSCAR code. *Annals of Nuclear Energy*. 2024. No. 199. 110364. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2024.110364>.
4. Dacquait F., Francescatto J., Tévisse E., Genin J.-B., You D., Cherpin C., Broutin F. Simulation of Co-60 uptake on stainless steel and alloy 690 using the OSCAR v1.4 code integrating an advanced dissolution-precipitation model. *Nuclear Engineering and Design*. 2023. No. 405. 112190. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2023.112190>.
5. Xie Y., Zhang J. Corrosion and deposition on the secondary circuit of steam generators A critical review. *Journal of Nuclear Science and Technology*. 2016. No. 53(10). P. 1455–1466. DOI: <https://doi.org/10.1080/00223131.2016.1152923>.
6. Yang G., Pointeau V., Tévisse E., Chagnes A. A review on clogging of recirculating steam generators in Pressurized-Water Reactors. *Progress in Nuclear Energy*. 2017. No. 97. P. 182–196. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2017.01.010>.
7. Goujon C., Pauporté T., Bescond A., Mansour C., Delaunay S., Bretelle J.-L. Effects of curative and preventive chemical cleaning processes on fouled steam generator tubes

in nuclear power plants. *Nuclear Engineering and Design*. 2017. No. 323. P. 120–132. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2017.07.022>.

8. Jeon S.-H., Song G. D., Hur D. H. Micro-Galvanic Corrosion of Steam Generator Materials within Pores of Magnetite Flakes in Alkaline Solutions. *Metals*. 2018. No. 8(11). 899. DOI: <https://doi.org/10.3390/met8110899>.

9. Hur D. H., Song G. D., Jeon S.-H., Lee H.-J. On the Use of NaOH Solution to Simulate the Crevice Conditions of a Nuclear Steam Generator. *Materials*. 2022. No. 15(23). 8471. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma15238471>.

10. Motta A. T., Couet A., Comstock R. J. Corrosion of zirconium alloys used for nuclear fuel cladding. *Annual Review of Materials Research*. 2015. No. 45(1). P. 311–343. DOI: <https://doi.org/10.1146/annurev-matsci-070214-020951>.

11. Ma H.-B., Yan J., Zhao Y.-H., Liu T., Ren Q.-S., Liao Y.-H., Zuo J.-D., Liu G., Yao M.-Y. Oxidation behavior of Cr-coated zirconium alloy cladding in high-temperature steam above 1200 °C. *npj Materials Degradation*. 2021. No. 5. 7. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41529-021-00155-8>.

12. Deng J., Geng D., Sun Q., Song Z., Sun J. Steam oxidation of Cr-coated zirconium alloy claddings at 1200 °C Kinetics transition and failure mechanism of Cr coatings. *Journal of Nuclear Materials*. 2023. No. 586. 154684. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2023.154684>.

13. Brachet J.-C., Rouesne E., Ribis J., Urvoy S., et al. High temperature steam oxidation of chromium-coated zirconium-based alloys Kinetics and process. *Corrosion Science*. 2020. No. 167. 108537. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2020.108537>.

14. Han X.-C., Xue J.-X., Peng S.-M., Zhang H.-B. An interesting oxidation phenomenon of Cr coatings on Zr-4 substrates in high temperature steam environment. *Corrosion Science*. 2019. No. 156. P. 117–124. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2019.05.017>.

15. Brachet J.-C., Le Saux M., Bischoff J., Palancher H., Chosson R., et al. Evaluation of Equivalent Cladding Reacted parameters of Cr-coated claddings oxidized in steam at 1200 °C in relation with oxygen diffusion/partitioning and post-quench ductility. *Journal of Nuclear Materials*. 2020. No. 533. 152106. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2020.152106>.

16. Li Z., Wang X., Chen H., Zhang R., Wei T., Yao L., Wang P. Review on performance of chromium-coated zirconium and its failure mechanisms. *Frontiers in Nuclear Engineering*. 2023. No. 2. 1212351. DOI: <https://doi.org/10.3389/fnucen.2023.1212351>.

17. Tang Y., Liao J., Yun D. Understanding the high-temperature corrosion behavior of zirconium alloys. *Frontiers in Materials*. 2024. No. 11. 1381818. DOI: <https://doi.org/10.3389/fmats.2024.1381818>.

18. Chen L., et al. Microstructure and high-temperature oxidation behaviour of anti-oxidation coating on zirconium alloys: An overview. *International Journal of Damage Mechanics*. 2024. (online). DOI: <https://doi.org/10.1177/02670844231214692>.

19. Trivedi K., Rane R., Mandapaka K. K., Lamba T. K., Joseph A., Roychowdhury S. High-Temperature and High-Pressure Steam Oxidation Behavior of TiN Coating Developed on Zircaloy-4 using Cylindrical Magnetron Sputtering Role of Thickness and Microstructure. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2025. No. 34(21). P. 24980–24996. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11665-025-11718-0>.

20. He H., Liu Y., Wang S., Zhang T., Chai X., Liu X. Review on corrosion-related unidentified deposit of pressurized water reactors. *Nuclear Engineering and Design*. 2025. No. 441. 114095. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2025.114095>.

21. Shtefan V. V., Kanunnikova N. A. Oxidation of AISI 304 steel in Al- and Ti-containing solutions. *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*. 2020. No. 56. P. 379. DOI: <https://doi.org/10.1134/S2070205120020239>.

22. Shtefan V., Kanunnikova N., Zuyok V. Comparative evaluation of microstructure and electrochemical, high-temperature corrosion rates of titanium- and aluminum-modified black chromium coatings on AISI 304 stainless steel. *Surface and Coatings Technology*. 2025. No. 497. 131706. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2024.131706>.

УДК 504.054

Н. О. Кануннікова, д-р філософії, ст. наук. співроб., О. В. Шестопапов, канд. техн. наук, професор, А. О. Сакун, д-р філософії, доцент,
А. С. Босюк, д-р філософії, старший викладач, О. В. Матющенко, аспірант

ЕКОЛОГІЧНІ НАСЛІДКИ КОРОЗІЇ У КОНТУРАХ ВВЕР-1000 ТА ПІДХОДИ ДО ЇХ МІНІМІЗАЦІЇ

Атомна енергетика потребує оцінювання екологічних ризиків, пов'язаних не лише з радіаційними чинниками, а й з матеріалознавчими процесами, що визначають обсяги вторинних відходів. У роботі узагальнено сучасні уявлення про корозію та стабільність оксидних плівок у контурах ВВЕР-1000 і показано, що екологічний ефект корозії реалізується через ланцюг «утворення продуктів → перенос → відкладення → очищення/промивки → формування забруднених стоків і відходів». Для першого контуру ключовими є розчинення та диспергування корозійних продуктів, їх акумуляція у системах очищення й у відкладеннях, що збільшує масу фільтрувальних матеріалів, сорбентів і шламів, які підлягають регламентованому поводженню. Для другого контуру відкладення на теплообмінних поверхнях погіршують теплопередачу, підвищують гідравлічні опори та провокують хімічні промивки – пряме джерело технологічних стоків. Окремо розглянуто сценарії перегріву, коли окиснення у водяній парі супроводжується зміною морфології оксидів і зростанням термомеханічних напружень, що підвищує ризики швидкого накопичення продуктів деградації. Запропоновано підходи мінімізації екологічних наслідків: керування водно-хімічним режимом, матеріалознавчі/поверхневі рішення для підвищення стабільності оксидних шарів та оптимізація очищення і промивок із фокусом на зменшення реагентів і відходоутворення. Перспективним напрямом є застосування хромвмісних покриттів для зниження мобільності корозійних продуктів. Практичну екологічну оцінку запропоновано виконувати через систему проксі-показників, зокрема масовий потік корозійних продуктів до систем очищення, інтенсивність депозиції/реосадження, частоту промивок і витрати реагентів, а також масу вилучених шламів, фільтрів і сорбентів. Сформульовані підходи можуть бути використані для обґрунтування рішень з оптимізації водно-хімічного режиму та стратегій очищення з метою мінімізації технологічних скидів і відходоутворення впродовж експлуатаційного циклу енергоблока.

Ключові слова: ВВЕР-1000, екологічна безпека, корозія, оксидні плівки, корозійні продукти, теплоносії, водяна пара, перегрів.

N. O. Kanunnikova, O. V. Shestopalov, A. O. Sakun, A. S. Bosiuk, O. V. Matiushchenko

ENVIRONMENTAL IMPACTS OF CORROSION IN VVER-1000 CIRCUITS AND APPROACHES TO THEIR MINIMIZATION

The nuclear power industry requires an assessment of environmental risks associated not only with radiation factors but also with material-related processes that determine the volume of secondary waste. This paper summarizes current understanding of corrosion and the stability of oxide films in VVER-1000 circuits and demonstrates that the environmental impact of corrosion occurs through the chain “formation of products → transport → deposition → cleaning/flushing → formation of contaminated effluents and waste.” For the primary circuit, the key factors are the dissolution and dispersion of corrosion products, their accumulation in cleaning systems and in deposits, which increases the mass of filter materials, sorbents, and sludge subject to regulated disposal. For the second circuit, deposits on heat exchange surfaces impair heat transfer, increase hydraulic resistance, and trigger chemical rinses—a direct source of process effluents. Scenarios of overheating are considered separately, where oxidation in water vapor is accompanied by changes in oxide morphology and an increase in thermomechanical stresses, which heightens the risk of rapid accumulation of degradation products. Approaches to minimizing environmental impacts are proposed: control of the water-chemical regime, materials science/surface solutions to increase the stability of oxide layers, and optimization of cleaning and rinsing with a focus on reducing reagent use and waste generation. A promising direction is the use of chromium-containing coatings to reduce the mobility of corrosion products. A practical environmental assessment is proposed. It is proposed that practical environmental assessments be conducted using a system of proxy indicators, including the mass flow of corrosion products into treatment systems, the intensity of deposition/redeposition, the frequency of backwashing and reagent consumption, as well as the mass of removed sludge, filters, and sorbents. The formulated approaches can be used to justify decisions on optimizing the water-chemical regime and treatment strategies with the aim of minimizing process discharges and waste generation throughout the power unit’s operational cycle.

Keywords: VVER-1000, environmental safety, corrosion, oxide films, corrosion products, coolants, steam, overheating.

Отримано редколегією 16.03.2026

Кануннікова Надія Олександрівна (Nadiia Kanunnikova), д-р філософії, ст. науковий співробітник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», <https://orcid.org/0000-0003-3611-6729>;

Шестопалов Олексій Валерійович (Oleksii Shestopalov), канд. техн. наук, професор, зав. каф. Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», <https://orcid.org/0000-0001-6268-8638>;

Сақун Антоніна Олегівна (Antonina Sakun), д-р філософії, доцент Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», <https://orcid.org/0000-0002-1079-7856>;

Босюк Альона Сергіївна (Alona Bosiuk), д-р філософії, ст. викладач Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», <https://orcid.org/0000-0001-5254-2272>;

Матющенко Олександр Вікторович (Oleksandr Matiushchenko), аспірант Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», <https://orcid.org/0009-0002-8771-6935>.

П. О. Некрасов, д-р техн. наук, професор, Д. А. Арутюнян, аспірант

СУЧАСНІ МЕТОДОЛОГІЧНІ ПІДХОДИ ДО АНАЛІЗУ ПЕРЕЕСТЕРИФІКОВАНИХ ЖИРІВ

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

Ключові слова: модифіковані жири, ферментативне переестерифікування, мас-спектрометрія, хроматографія, триацилгліцерини.

Вступ

Переестерифіковані жири належать до групи модифікованих ліпідів, які отримують в результаті перерозподілу ацильних залишків між молекулами триацилгліцеринів (TAG), головних компонентів жирів, без зміни їхнього сумарного жирнокислотного складу. Така модифікація може здійснюватися як хімічними, так і ферментативними методами, причому останні забезпечують більш контрольований і селективний перебіг процесу.

На відміну від гідрогенізації, цей процес не супроводжується зміною ступеня ненасиченості жирних кислот і не призводить до утворення транс-ізомерів жирних кислот. Це є суттєвою перевагою, оскільки транс-ізомери жирних кислот пов'язують із підвищеним ризиком серцево-судинних захворювань. Відсутність таких небажаних сполук підвищує харчову та біологічну цінність отриманих продуктів. Завдяки цьому переестерифікування розглядають як перспективний метод модифікування харчових жирів.

У процесі переестерифікування відбувається зміна позиційного розташування жирних кислот у гліцериновій молекулі TAG. Це, у свою чергу, істотно впливає на фізико-хімічні властивості жирів. Зокрема, змінюються такі властивості, як температура плавлення, профіль твердості, характер кристалізації, поліморфізм, пластичність та здатність до емульгування. Такі зміни мають велике значення при виробництві маргаринів, кондитерських жирів, спредів та інших продуктів, де важливі текстура і стабільність.

Крім того, зміна структури TAG може впливати на біодоступність жирних кислот і швидкість їх засвоєння організмом. Наприклад, розташування насичених і ненасичених кислот у певних позиціях молекули визначає особливості їх гідролізу ферментами травної системи.

З огляду на складність структурних змін, дослідження переестерифікованих жирів потребує застосування сучасних аналітичних методів, які дозволяють оцінити не лише загальний жирнокислотний склад, а також і позиційний розподіл кислот у молекулі та структуру TAG.

Метою цієї роботи є узагальнення сучасних підходів до аналітичного дослідження переестерифікованих жирів із акцентом на високороздільні мас-спектрометричні, хроматографічні, спектроскопічні, термічні, реологічні та оміксні методи аналізу.

Сучасні аналітичні підходи до дослідження переестерифікованих жирів

Сучасні підходи до аналізу переестерифікованих жирів ґрунтуються на комплексному використанні різних фізико-хімічних методів. Серед них важливе місце посідають хроматографічні методи, зокрема газова та рідинна хроматографія, які дозволяють визначати жирнокислотний склад і профіль TAG. Спектроскопічні методи, такі як інфрачервона спектроскопія (ІЧ) та ядерний магнітний резонанс (ЯМР), застосовуються для дослідження структурних особливостей і ступеня упорядкованості ліпідів.

Термічний аналіз, включаючи диференціальну сканувальну калориметрію, дає можливість оцінити температури плавлення та кристалізації, а також теплові ефекти, що супроводжують фазові переходи. Реологічні дослідження використовуються для визначення в'язкості, пластичності та інших механічних властивостей жирів, що є критично важливими для їх технологічного застосування.

Таким чином, комплексне поєднання різних аналітичних підходів забезпечує повне розуміння складу, структури та властивостей переестерифікованих жирів, що є необхідним для їх ефективного використання в харчовій промисловості та розробки продуктів із заданими характеристиками.

Сучасні дослідження жирів, в тому числі модифікованих, зокрема продуктів ферментативного переестерифікування, базуються на використанні високочутливих аналітичних методів, які здатні детально характеризувати молекулярну структуру ліпідів, позиційний розподіл ацильних залишків у TAG, ступінь окиснення, поліморфізм та фізико-хімічні властивості жирових систем. Упродовж останніх років найбільш інтенсивно розвиваються наступні підходи: Untargeted Lipidomics, Ion Mobility Mass Spectrometry, Orbitrap Mass Spectrometry, AI-assisted Spectroscopy, Multidimensional Chromatography, Foodomics та інтегровані Metabolomics/lipidomics технології [1–8].

Нецільова ліпідоміка (Untargeted Lipidomics) є одним із сучасних високотехнологічних напрямів аналітичної хімії ліпідів [1, 2]. Метод спрямований на максимально повне виявлення та напівкількісний аналіз усіх ліпідних компонентів у зразку без попереднього вибору цільових молекул. Основою цього підходу є поєднання надвисокоєфективної рідинної хроматографії (UHPLC – Ultra High Performance Liquid Chromatography) із високороздільною мас-спектрометрією (HRMS – High Resolution Mass Spectrometry) [1]. У процесі аналізу проводять екстракцію ліпідів, їх хроматографічне розділення, іонізацію та подальший мас-спектрометричний аналіз із використанням біоінформатики та хемометрії [1, 2]. Untargeted Lipidomics дозволяє виявляти нові молекулярні види TAG, продукти окиснення, позиційні ізомери та мінорні ліпіди, що особливо важливо для дослідження структурованих жирів після ферментативного переестерифікування [2]. Метод широко застосовується для аналізу жирових продуктів, що не містять транс-ізомерів жирних кислот, замінників жиру грудного молока та ліпідів структури ω -3 [2]. Основними перевагами є висока чутливість, комплексність аналізу та можливість одночасного визначення тисяч ліпідних молекул, але цей метод характеризується складною обробкою даних і високою вартістю обладнання [1].

ІМ-MS – мас-спектрометрія з іонною мобільністю (Ion Mobility Mass Spectrometry) є сучасним методом, який поєднує класичну мас-спектрометрію з додатковим розділенням іонів за їх просторовою структурою та поперечний переріз зіткнення іонів (collision cross section, CCS) [3]. Після іонізації молекули рухаються крізь

дрейфову трубку у потоці інертного газу під дією електричного поля. Швидкість руху залежить не лише від маси іона, а й від його форми, розміру та конформації [3]. Це дозволяє ефективно розділяти ізомерні форми ліпідів, які практично неможливо диференціювати традиційними методами мас-спектрометрії [3]. ІМ-МС є надзвичайно перспективним методом для дослідження продуктів ферментативного переестерифікування, оскільки дозволяє аналізувати ізомери в *sn*-положенні та цис/транс-ізомери [3]. Додатковою перевагою є можливість визначення CCS, що забезпечує отримання додаткової структурної інформації про ліпіди [3].

Орбітальна високороздільна мас-спектрометрія (Orbitrap Mass Spectrometry/Orbitrap-MS) є одним із найточніших сучасних методів мас-спектрометричного аналізу [4]. Принцип роботи методу базується на русі іонів навколо центрального електрода по орбітальних траєкторіях. Частота осциляції іонів залежить від співвідношення маса/заряд (m/z), а отриманий сигнал обробляється за допомогою перетворень Фур'є [4]. Orbitrap-MS характеризується дуже високою роздільною здатністю (до 1 000 000), високою точністю визначення мас (<1 ppm) та ультрачутливістю до слідів [4]. Метод широко використовується у Lipidomics, Metabolomics та Foodomics для ідентифікації TAG, продуктів окиснення жирів, фосфоліпідів та інших компонентів складних харчових матриць [2, 4]. Для модифікованих жирів Orbitrap-MS є особливо цінним через можливість точного визначення структурних змін після ферментативного переестерифікування [2].

Спектроскопія з використанням штучного інтелекту (AI-assisted Spectroscopy) є новим перспективним напрямом, який поєднує спектроскопічні методи з алгоритмами машинного навчання та штучного інтелекту [5]. Найчастіше використовуються FTIR (Fourier Transform Infrared Spectroscopy – інфрачервона спектроскопія з перетворенням Фур'є), NIR (Near Infrared Spectroscopy – ближня інфрачервона спектроскопія) та гіперспектральна візуалізація [5]. Спектральні дані обробляються за допомогою PCA (Principal Component Analysis), PLS (Partial Least Squares) та алгоритмів глибокого навчання [5]. Такий підхід дає можливість прогнозувати твердість жирів, ступінь переестерифікації, рівень окиснення та термічну поведінку структурованих ліпідів [5]. Основними перевагами AI-assisted Spectroscopy є висока швидкість аналізу, можливість неруйнівного контролю та перспективність для онлайн-моніторингу технологічних процесів [5].

Multidimensional Chromatography (багатовимірна хроматографія) – це поєднання двох або більше хроматографічних систем для підвищення ефективності розділення складних сумішей. Найпоширенішими варіантами є GC×GC (комплексна двовимірна газова хроматографія), LC×LC (двовимірна рідинна хроматографія) та LC-GC системи. Метод дозволяє аналізувати надзвичайно складні суміші ліпідів, визначати слідові сполуки, продукти окиснення та транс-ізомери. Для структурованих ліпідів багатовимірна хроматографія є важливою через здатність ефективно розділяти велику кількість ізомерних TAG, що утворюються після ферментативного переестерифікування [7].

Фудоміка (Foodomics) є інтегрованим міждисциплінарним напрямом, що поєднує харчову науку, оміксні технології, системну біологію та біоінформатику з метою комплексного дослідження складу, властивостей і біологічної дії харчових продуктів [6]. Основною метою Foodomics є вивчення безпечності, автентичності, харчової цінності та функціональних властивостей продуктів [6]. Для модифікованих жирів Foodomics дозволяє оцінювати якість і безпечність, шляхи окиснення, біоактивні ліпіди

та процеси фальсифікації [6]. Використання Foodomics є особливо актуальним для жирів та заміників жиру грудного молока [6].

Інтеграція метаболоміки та ліпідоміки (Metabolomics/lipidomics Integration) є сучасним системним підходом, який дає можливість одночасно досліджувати ліпіди, органічні кислоти, продукти окиснення та інші метаболіти [1, 2, 8]. Така інтеграція забезпечує можливість аналізу метаболічних шляхів, окислювальної деградації та біологічного впливу структурованих ліпідів [8]. Метод активно застосовується у дослідженнях функціональних жирів, нутрицевтичних ліпідів та персоналізованого харчування [2, 8].

Приклади застосування сучасних аналітичних підходів

Сучасні методи Lipidomics, Foodomics та високороздільної мас-спектрометрії активно використовуються для дослідження конкретних харчових продуктів. Особливо інтенсивно ці підходи застосовуються для аналізу рибних продуктів, молочних жирів, м'ясних систем, ферментованих харчових продуктів та модифікованих рослинних олій. Використання Untargeted Lipidomics, Orbitrap-MS, Ion Mobility-MS та Multidimensional Chromatography дозволяє досліджувати не лише жирнокислотний склад, а й глибокі структурні зміни ліпідів, що виникають у процесі ферментації, окиснення або ферментативної переетирифікації.

Одним із найбільш показових прикладів застосування Untargeted Lipidomics є дослідження ферментованої золотой помфрети (*Trachinotus ovatus*), у якому використовували ультраефективну високороздільну рідинну хроматографію (UHPLC-Q-Exactive) Orbitrap-MS/MS для аналізу змін ліпідного профілю під час ферментації [9]. Автори встановили, що протягом ферментації відбувається суттєва перебудова гліцерофосфоліпідів та гліцероліпідів. Усього було ідентифіковано 998 ліпідів, які належали до шести основних класів. Найбільш значущими виявилися зміни TAG, діацилгліцеринів та поліненасичених жирних кислот, зокрема докозагексаєнова кислота ейкозапентаєнова кислота. Використання Untargeted Lipidomics дозволило встановити, що ферментація суттєво впливає на метаболізм гліцерофосфоліпідів, який виявився ключовим метаболічним шляхом. Orbitrap-MS забезпечив високу точність визначення молекулярних мас та дозволив ідентифікувати мінорні молекулярні види ліпідів, які неможливо виявити традиційними методами газової хроматографії [9].

Метод мас-спектрометрії з іонною рухливістю (Ion Mobility Mass Spectrometry) був успішно застосований для дослідження ліпідного складу м'яса свинини та курятини у роботі, присвяченій розробленню аналітичного процесу мас-спектрометрії високої роздільної здатності (High-Resolution Mass Spectrometry) для Food Lipidomics [10]. У дослідженні використовували TIMS-QTOF-MS (Trapped Ion Mobility Spectrometry Quadrupole Time-of-Flight Mass Spectrometry), що дало можливість поєднати хроматографічне розділення, іонну мобільність та високороздільну мас-спектрометрію. Авторами було ідентифіковано 395 унікальних ліпідів у зразках м'яса. Встановлено, що Ion Mobility Separation значно покращує селективність та розділення ізомерних форм TAG і фосфоліпідів. Особливо важливо, що використання TIMS дозволило ефективно розділяти структурні ізомери, які мають однакове співвідношення m/z , але різну просторову конфігурацію [10].

Метод високороздільної мас-спектрометрії (Orbitrap MS) активно використовується для аналізу молочних продуктів. Зокрема, у дослідженні сиру Mozzarella було розроблено метод прискореної екстракції розчинником (Accelerated Solvent Extraction)

у поєднанні з UHPLC-Q-Orbitrap-MS для детального аналізу ліпідного профілю сиру [11]. Автори показали, що Orbitrap-MS дозволяє ідентифікувати широкий спектр TAG, фосфоліпідів та продуктів окиснення. Висока роздільна здатність Orbitrap-MS забезпечила точне визначення другорядних видів ліпідів, що мають важливе значення для формування смаку та аромату молочних продуктів. Крім того, було встановлено, що метод є надзвичайно ефективним для нецільового ліпідного профілювання складних харчових матриць [11].

Сучасні підходи Foodomics широко застосовуються для дослідження харчових жирів та функціональних продуктів. У великому огляді щодо Lipidomics на основі мас-спектрометрії у дослідженнях Foodomics автори описали використання Lipidomics для дослідження автентичності харчових продуктів, оцінки окиснення жирів, контролю фальсифікації та визначення біологічно активних ліпідів [12]. Особливу увагу приділено використанню UHPLC-MS/MS, Orbitrap-MS та QTOF-MS у дослідженнях рослинних олій, рибних жирів, м'яса та молочних продуктів. Автори підкреслюють, що інтеграція Foodomics та Lipidomics дозволяє досліджувати не лише склад ліпідів, а й їхній вплив на здоров'я людини, процеси окиснення та харчову цінність продуктів [12].

Інтеграція Metabolomics та Lipidomics особливо активно використовується для дослідження модифікованих рибних жирів. У сучасному дослідженні ферментативної переестерифікації риб'ячого жиру з нутрощів білого амура (*Stenopharyngodon idella*) автори використали UHPLC-Q-TOF/MS та GC-MS для одночасного аналізу ліпідного і ароматичного профілів [13]. Було встановлено, що ферментативне переефтеріфікування суттєво змінює склад TAG та фосфоліпідів, а також впливає на утворення летких ароматичних сполук. Використання інтегрованого Metabolomics/Lipidomics підходу дозволило встановити взаємозв'язок між структурними змінами ліпідів та зменшенням рибного запаху. Автори показали, що модифікація ліпідної структури впливає на утворення альдегідів, спиртів та естерів, які визначають смаковий профіль модифікованого жиру [13].

Багатовимірна хроматографія та Orbitrap-HRMS широко використовуються для аналізу слідів ліпідів у складних харчових системах. У роботі щодо визначення TAG із фурановими жирними кислотами у риб'ячому жирі застосовували LC-Orbitrap-HRMS [14]. Метод дозволив уперше ідентифікувати TAG, до складу яких входять фуранові жирні кислоти (FuFA) у зразках риб'ячого жиру. Висока роздільна здатність Orbitrap-HRMS забезпечила виявлення ультраслідових ліпідних сполук, які раніше не визначались у рамках класичних ліпідомічних підходів. Автори підкреслюють, що поєднання високоефективної рідинної хроматографії та Orbitrap-MS є одним із найперспективніших напрямів сучасної Food Lipidomics [14].

Спектроскопія з використанням алгоритмів штучного інтелекту та сучасні біоінформатичні підходи також починають активно використовуватись у Lipidomics. У нових роботах застосовуються алгоритми машинного навчання та великі мовні моделі для автоматизованої обробки мас-спектрометричних даних і структурної анотації невідомих ліпідів [15, 16]. Такі підходи дозволяють значно прискорити ідентифікацію ліпідів, позиційних ізомерів та продуктів окиснення, що особливо важливо для Untargeted Lipidomics і Foodomics-досліджень складних харчових систем.

Висновки

Дослідження переестерифікованих жирів потребує застосування широкого спектра аналітичних методів, які дозволяють комплексно оцінити як хімічний склад, так і структурні особливості ліпідних систем. Це зумовлено тим, що переестерифікування не змінює загальний жирнокислотний склад, однак суттєво впливає на молекулярну організацію триацилгліцеринів, їх позиційний розподіл і надмолекулярну структуру.

Ключову роль у таких дослідженнях відіграють хроматографічні, спектроскопічні та термічні методи аналізу, які забезпечують отримання детальної інформації про склад, структуру та фазові переходи ліпідів. Окреме значення мають також методи визначення фізико-хімічних показників і реологічні дослідження, що дозволяють оцінити технологічні властивості жирів, їхню стабільність, текстуру та поведінку під час переробки і зберігання.

Комплексне використання зазначених методів забезпечує отримання достовірної, взаємодоповнюючої інформації про властивості жирових систем на різних рівнях організації – від молекулярного до макроскопічного. Це дозволяє не лише глибше зрозуміти особливості структурних змін, що відбуваються в процесі переестерифікування, але й обґрунтовано оцінити технологічну придатність отриманих продуктів.

Отже, інтегрований підхід до аналізу є необхідною умовою сучасного дослідження переестерифікованих жирів і становить основу для їхнього ефективного використання в харчовій промисловості та розробки продуктів із заданими функціональними характеристиками.

Література

1. Cajka T., Fiehn O. Toward merging untargeted and targeted methods in mass spectrometry-based metabolomics and lipidomics. *Analytical Chemistry*. 2016. Vol. 88, No. 1. P. 524–545. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.analchem.5b04491>.
2. Han X., Wang M., Wang C., Han R. Advances in lipidomics: analytical technologies and applications in disease biomarker discovery. *Journal of Chromatography B*. 2021. Vol. 1169. Art. 122604. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jchromb.2021.122604>.
3. Kyle J. E., Zhang X., Weitz K. K. et al. Uncovering biologically significant lipid isomers with liquid chromatography, ion mobility spectrometry and mass spectrometry. *Analyt.* 2016. Vol. 141, No. 5. P. 1649–1659. DOI: <https://doi.org/10.1039/C5AN02062J>.
4. Hu Q., Noll R. J., Li H. et al. The Orbitrap: a new mass spectrometer. *Journal of Mass Spectrometry*. 2005. Vol. 40, No. 4. P. 430–443. DOI: <https://doi.org/10.1002/jms.856>.
5. Bevilacqua M., Bucci R., Magri A. D. et al. Tracing the origin of extra virgin olive oils by infrared spectroscopy and chemometrics: a case study. *Analytica Chimica Acta*. 2012. Vol. 717. P. 39–51. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aca.2011.12.027>.
6. Cifuentes A. Food analysis and foodomics. *Journal of Chromatography A*. 2009. Vol. 1216, No. 43. P. 7109–7115. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2009.05.018>.
7. Lv W., Shi X., Wang S., Xu G. Multidimensional liquid chromatography-mass spectrometry for metabolomic and lipidomic analyses. *Trends in Analytical Chemistry*. 2019. Vol. 120. P. 115–129. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trac.2018.11.001>.
8. Phaner C. J., Liu S., Zhou X., Reid G. E. Functional group selective derivatization and gas-phase fragmentation reactions of plasmalogen glycerophospholipids. *Mass Spectrometry Reviews*. 2021. Vol. 40, No. 2. P. 123–148. DOI: <https://doi.org/10.1002/mas.21644>.

9. Wang Y., Li Z., Feng X. et al. UHPLC-Q-Exactive Orbitrap MS/MS-based untargeted lipidomics reveals molecular mechanisms and metabolic pathways of lipid changes during golden pomfret (*Trachinotus ovatus*) fermentation. *Food Chemistry*. 2022. Vol. 396. Art. 133676. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.133676>.
10. Kakouri A., Moulos P., Zervou M. Food Lipidomics: Development and application of a cutting-edge untargeted 4D HRMS workflow for the lipid profiling of food of animal origin. *Journal of Food Composition and Analysis*. 2024. Vol. 131. Art. 106232. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2024.106232>.
11. Mentana A., Zianni R., Campaniello M. et al. Optimizing accelerated solvent extraction combined with liquid chromatography-Orbitrap mass spectrometry for efficient lipid profile characterization of mozzarella cheese. *Food Chemistry*. 2022. Vol. 394. Art. 133542. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.133542>.
12. Luo X., Cheng Y., Zhou Q. Mass spectrometry-based lipidomics as a powerful platform in foodomics research. *Trends in Food Science & Technology*. 2021. Vol. 107. P. 358–376. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.10.045>.
13. Li J., Zhou H., Xu L. et al. Enzymatic interesterification of freshwater fish oil from grass carp (*Ctenopharyngodon idella*) viscera: a novel approach to mitigate fishy odors through lipid restructuring. *Food Chemistry X*. 2025. Vol. 31. Art. 103109. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2025.103109>.
14. Hellner G., Pohl P., Vetter W. LC-Orbitrap-HRMS method for analysis of traces of triacylglycerols featuring furan fatty acids. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*. 2023. Vol. 415. P. 875–885. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00216-022-04480-y>.
15. Aguilar-Mogas A., Sales-Pardo M., Navarro M. et al. iMet: A computational tool for structural annotation of unknown metabolites from tandem mass spectra. *Bioinformatics*. 2017. Vol. 33, No. 17. P. 2730–2732. DOI: <https://doi.org/10.1093/bioinformatics/btx245>.
16. Beveridge C., Iyer S., Randolph C. et al. Comprehensive Lipidomic Automation Workflow using Large Language Models. *arXiv preprint*. 2024. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2403.15076>.

Bibliography (transliterated)

1. Cajka T., Fiehn O. Toward merging untargeted and targeted methods in mass spectrometry-based metabolomics and lipidomics. *Analytical Chemistry*. 2016. Vol. 88, No. 1. P. 524–545. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.analchem.5b04491>.
2. Han X., Wang M., Wang C., Han R. Advances in lipidomics: analytical technologies and applications in disease biomarker discovery. *Journal of Chromatography B*. 2021. Vol. 1169. Art. 122604. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jchromb.2021.122604>.
3. Kyle J. E., Zhang X., Weitz K. K. et al. Uncovering biologically significant lipid isomers with liquid chromatography, ion mobility spectrometry and mass spectrometry. *Analyt.* 2016. Vol. 141, No. 5. P. 1649–1659. DOI: <https://doi.org/10.1039/C5AN02062J>.
4. Hu Q., Noll R. J., Li H. et al. The Orbitrap: a new mass spectrometer. *Journal of Mass Spectrometry*. 2005. Vol. 40, No. 4. P. 430–443. DOI: <https://doi.org/10.1002/jms.856>.
5. Bevilacqua M., Bucci R., Magri A. D. et al. Tracing the origin of extra virgin olive oils by infrared spectroscopy and chemometrics: a case study. *Analytica Chimica Acta*. 2012. Vol. 717. P. 39–51. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aca.2011.12.027>.

6. Cifuentes A. Food analysis and foodomics. *Journal of Chromatography A*. 2009. Vol. 1216, No. 43. P. 7109–7115. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2009.05.018>.
7. Lv W., Shi X., Wang S., Xu G. Multidimensional liquid chromatography-mass spectrometry for metabolomic and lipidomic analyses. *Trends in Analytical Chemistry*. 2019. Vol. 120. P. 115–129. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trac.2018.11.001>.
8. Fhaner C. J., Liu S., Zhou X., Reid G. E. Functional group selective derivatization and gas-phase fragmentation reactions of plasmalogen glycerophospholipids. *Mass Spectrometry Reviews*. 2021. Vol. 40, No. 2. P. 123–148. DOI: <https://doi.org/10.1002/mas.21644>.
9. Wang Y., Li Z., Feng X. et al. UHPLC-Q-Exactive Orbitrap MS/MS-based untargeted lipidomics reveals molecular mechanisms and metabolic pathways of lipid changes during golden pomfret (*Trachinotus ovatus*) fermentation. *Food Chemistry*. 2022. Vol. 396. Art. 133676. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.133676>.
10. Kakouri A., Moulos P., Zervou M. Food Lipidomics: Development and application of a cutting-edge untargeted 4D HRMS workflow for the lipid profiling of food of animal origin. *Journal of Food Composition and Analysis*. 2024. Vol. 131. Art. 106232. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2024.106232>.
11. Mentana A., Zianni R., Campaniello M. et al. Optimizing accelerated solvent extraction combined with liquid chromatography-Orbitrap mass spectrometry for efficient lipid profile characterization of mozzarella cheese. *Food Chemistry*. 2022. Vol. 394. Art. 133542. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.133542>.
12. Luo X., Cheng Y., Zhou Q. Mass spectrometry-based lipidomics as a powerful platform in foodomics research. *Trends in Food Science & Technology*. 2021. Vol. 107. P. 358–376. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.10.045>.
13. Li J., Zhou H., Xu L. et al. Enzymatic interesterification of freshwater fish oil from grass carp (*Ctenopharyngodon idella*) viscera: a novel approach to mitigate fishy odors through lipid restructuring. *Food Chemistry X*. 2025. Vol. 31. Art. 103109. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2025.103109>.
14. Hellner G., Pohl P., Vetter W. LC-Orbitrap-HRMS method for analysis of traces of triacylglycerols featuring furan fatty acids. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*. 2023. Vol. 415. P. 875–885. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00216-022-04480-y>.
15. Aguilar-Mogas A., Sales-Pardo M., Navarro M. et al. iMet: A computational tool for structural annotation of unknown metabolites from tandem mass spectra. *Bioinformatics*. 2017. Vol. 33, No. 17. P. 2730–2732. DOI: <https://doi.org/10.1093/bioinformatics/btx245>.
16. Beveridge C., Iyer S., Randolph C. et al. Comprehensive Lipidomic Automation Workflow using Large Language Models. *arXiv preprint*. 2024. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2403.15076>.

УДК 664.3.032:543.544

П. О. Некрасов, д-р техн. наук, професор, Д. А. Арутюнян, аспірант

СУЧАСНІ МЕТОДОЛОГІЧНІ ПІДХОДИ ДО АНАЛІЗУ ПЕРЕЕТЕРИФІКОВАНИХ ЖИРІВ

У статті узагальнено сучасні методологічні підходи до аналізу переетерифікованих жирів як важливої групи модифікованих ліпідних систем, властивості яких ви-

значаються не лише жирнокислотним складом, а й позиційним розподілом ацильних залишків у молекулах триацилгліцеринів. Зазначено, що об'єктивне оцінювання таких систем потребує одночасного визначення молекулярного профілю триацилгліцеринів, розподілу жирних кислот за окремими положеннями гліцеринової основи, ступеня окиснення, поліморфних перетворень і показників технологічної функціональності. Розглянуто можливості хроматографічних, спектроскопічних, термічних і реологічних методів у дослідженні складу, структури, фазових переходів, кристалізаційної поведінки та функціональних характеристик жирових систем.

Показано, що жоден окремий метод не забезпечує вичерпної характеристики переестерифікованих жирів, тому найбільш інформативним є поєднання взаємодоповнювальних аналітичних підходів. Особливу увагу приділено високороздільним мас-спектрометричним і оміксним підходам, зокрема нецільовій ліпідоміці, мас-спектрометрії з іонною мобільністю, високороздільній мас-спектрометрії на основі орбітреп-аналізатора, багатовимірній хроматографії, фудоміці та інтегрованим метаболомно-ліпідомним технологіям. Підкреслено, що застосування цих методів забезпечує поглиблену характеристику молекулярних видів ліпідів, позиційних ізомерів триацилгліцеролів, продуктів окиснення та структурних змін, які відбуваються під час ферментативного переестерифікування.

Окремо наголошено на значенні сучасних інструментів оброблення аналітичних даних, зокрема хемометричних методів і алгоритмів машинного навчання, для інтерпретації складних ліпідомних профілів. Такий підхід дає змогу підвищити достовірність ідентифікації ліпідних компонентів, виявляти маркери структурної модифікації жирів і прогнозувати їхні технологічні властивості. Обґрунтовано доцільність комплексного поєднання сучасних аналітичних методів для контролю якості, оцінювання безпечності та розроблення модифікованих жирів із заданими властивостями.

Ключові слова: модифіковані жири, ферментативне переестерифікування, мас-спектрометрія, хроматографія, триацилгліцерини.

P. Nekrasov, D. Arutiunian

MODERN METHODOLOGICAL APPROACHES TO THE ANALYSIS OF INTERESTERIFIED FATS

The article summarizes modern methodological approaches to the analysis of interesterified fats as an important group of modified lipid systems whose properties are determined not only by their fatty acid composition but also by the positional distribution of acyl residues in triacylglycerol molecules. It is noted that an objective assessment of such systems requires the simultaneous determination of the molecular profile of triacylglycerols, the distribution of fatty acids at specific positions of the glycerol backbone, the degree of oxidation, polymorphic transformations, and indicators of technological functionality. The potential of chromatographic, spectroscopic, thermal, and rheological methods for studying the composition, structure, phase transitions, crystallization behaviour, and functional characteristics of fat systems is considered.

It is shown that no single method provides an exhaustive characterization of interesterified fats; therefore, the combination of complementary analytical approaches is the most

informative strategy. Particular attention is paid to high-resolution mass spectrometric and omics-based approaches, including untargeted lipidomics, ion mobility mass spectrometry, high-resolution mass spectrometry based on an Orbitrap analyser, multidimensional chromatography, foodomics, and integrated metabolomics-lipidomics technologies. It is emphasized that the application of these methods enables an in-depth characterization of lipid molecular species, positional isomers of triacylglycerols, oxidation products, and structural changes occurring during enzymatic interesterification.

Special emphasis is also placed on the importance of modern analytical data-processing tools, particularly chemometric methods and machine-learning algorithms, for the interpretation of complex lipidomic profiles. Such an approach makes it possible to improve the reliability of lipid component identification, detect markers of structural fat modification, and predict their technological properties. The expediency of the integrated use of modern analytical methods for quality control, safety assessment, and the development of modified fats with predetermined properties is substantiated.

Keywords: modified fats, enzymatic interesterification, mass spectrometry, chromatography, triacylglycerols.

Отримано редколегією 15.01.2026

Некрасов Павло Олександрович (Pavlo Nekrasov), д-р техн. наук, професор, професор Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», <https://orcid.org/0000-0003-1791-8822>;

Арутюнян Дмитро Андранікович (Dmytro Arutiunian), аспірант Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», <https://orcid.org/0009-0001-4624-4313>.

І. О. Лаврова, канд. техн. наук, доцент, М. І. Грубник, аспірант,
В. В. Владимиренко, PhD, асистент, А. Г. Корягін, канд. хім. наук, доцент,
С. І. Авіна, канд. техн. наук, доцент

ПРИРОДНІ ВОСКИ ЯК СИРОВИНА ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА ПРИРОДНИХ, ЕКОЛОГІЧНО БЕЗПЕЧНИХ ТА БІОРОЗКЛАДНИХ ПАКУВАЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків

Ключові слова: віск бджолиний, гірський віск, карнаубський віск, композити, екстракти, біологічно активні речовини, антибактеріальна дія.

Вступ. Останнім часом у всьому світі яскраво проявився тренд на використання природних восків у сфері виготовлення композитних пакувальних та захисних матеріалів для хімічної, харчової та фармацевтичної промисловості, які характеризуються екологічною безпечністю та здатністю до біорозкладання. [1]. Гірський віск, озокерит та бджолиний віск – це унікальні природні ресурси України. Тому вивчення фізико-хімічних властивостей та структури цих органічних речовин мають вагоме значення у створенні хімічних технологій їх переробки [2, 3].

Актуальність даної роботи обумовлена втратами продуктів харчування, спричиненими мікробіологічним псуванням. Втрати і псування харчової продукції нині є нагальною проблемою розробки стійких продовольчих систем. Вони надають негативний вплив на продовольчу безпеку та значною мірою сприяють викиду парникових газів, забрудненню навколишнього середовища, деградації природних екосистем та втраті біорізноманіття, а також є нераціональним використанням ресурсів, що використовуються у харчових технологіях.

Запобігання втратам і псуванню харчової продукції є завданням, яке було визначено в рамках узгоджених на міжнародному рівні цілей у галузі сталого розвитку. Відповідаючи за її реалізацію, Програма ООН з навколишнього середовища (ЮНЕП) вимірює та відстежує прогрес у справі щодо скорочення втрат та псування харчової продукції за допомогою Глобального індексу втрат та псування харчової продукції [4].

Антимікробна упаковка харчових продуктів має на меті зменшити або пригнічити ріст мікроорганізмів, що спричиняють псування, або патогенів, які можуть бути присутніми в самому продукті або пакувальному матеріалі. Необхідно обмежити ріст мікробів на всіх етапах – від транспортування до кінцевого споживання. Цей тип упаковки досяг значного прогресу за останні роки завдяки зростаючому попиту на безпеку харчових продуктів, гігієну та збереження [5].

Об'єктом дослідження були зразки карнаубського воску, бджолиного воску та екстрагований гірський віск з бурого вугілля Александрійського родовища.

Результати дослідження

Карнаубський віск. Його добувають із листя пальми *Copernicia Cerifera*. Це дерево росте берегами річок у північно-східних районах Бразилії, досягаючи середньої висоти 25–35 метрів. Віск отримують із держаків її віялового листя, він запобігає зне-

водненню дерева в екваторіальному кліматі. Збір листя й пагонів відбувається під час сухого періоду з вересня до лютого. Обрізані листя сушаться на сонці та механічно оббиваються, щоб видалити сирий віск. Цей неочищений віск, у формі порошку, переноситься з сільської місцевості та продається для вантажовідправників на експорт.

Карнаубський віск містить переважно складні ефіри: жирних кислот (80–85 %), жирні спирти (10–15 %), кислоти (3–6 %) і вуглеводні (1–3 %). Специфічним для карнаубського воску є вміст етерифікованих жирних діалкоголей (майже 20 %), гідроксильованих жирних кислот (приблизно 6 %), коричневої кислоти й антиоксидантів (приблизно 10 %) [6].

Зовнішній вигляд воску – тверді тендітні пластівці, пластинки, порошок. Властивості: ножем не ріжеться – розсипається, на зламі твердий, за кімнатної температури крихкий. Колір від блідо-жовтого до глибокого золотого. Ця різниця є результатом віку дерева, що дав урожай і умов його розвитку. Запах: без запаху або слабкий солодкуватий. Питома вага: 0,999. Температура плавлення: 82–91 °C, розм'якшується за 40–45° C. Число омилення: 78–89. Неомильна фракція складає 50–55 % [7]. Розчинний в рослинних оліях.

Сфери застосування: Карнаубський віск – найтвердіший і найстійкіший (температура плавлення +83...+91 °C) з восків рослинного та тваринного походження. Через свої гіпоалергенні та пом'якшувальні властивості, а також свій блиск, карнаубський віск застосовується як інгредієнт для багатьох косметичних сумішей, де він використовується як загусник у різноманітних препаратах. Також використовується в медицині як покриття лікарських препаратів у формі таблеток.

Він не токсичний, тому широко застосовується для створення глясових покриттів в автомобільному воску, лаках для взуття, зубних ниток, харчових продуктах. Він є основним інгредієнтом у поєднанні з кокосовою олією для покриття фруктів для транспортування на далекі відстані, бо має чудову ізолюючу дію.

Спосіб використання: розплавити перед застосуванням, додавати в жирну фазу продуктів, що потребують емульгування. Для того, щоб використовувати карнаубський віск у рецепті, він має бути нагрітий до вищої температури, ніж температура плавлення. Якщо треба замінити бджолиний віск карнаубським, його концентрація в рецепті має бути приблизно вдвічі меншою. Карнаубський віск під час використання в бальзамах для губ або стиках, змішаних з оліями та батерами: загущує й підвищує температуру плавлення й плівкоутворювальні властивості. Якщо використовувати його в поєднанні з іншими восками (канделельський, бджолиний) у стиках, помадах і олівцях, продукт стане щільнішим і покращиться зовнішній вигляд. У разі додавання до крему, треба враховувати, що карнаубського воску потрібно не більш ніж 3 %, він загустить емульсію та підвищить її стабільність і плівкотворну здатність. При надлишку цього воску в рецептурі, може робити продукти занадто крихкими. Крихкість – його головний недолік.

Карнаубський віск сумісний із більшістю тваринних, рослинних і мінеральних восків і великою кількістю природних і синтетичних смол та олій.

Сирий гірський віск (монтан-віск або бітум А), видобуваний екстракцією органічними розчинниками (бензин, спиртобензольна суміш, чистий бензол та інші) з бітумінозного бурого вугілля, – складна суміш природних восків і воскових смол.

Зовнішній вигляд воску – литі кубики або пірамідки брунатного кольору, не має специфічного запаху або має легкий торф'яний аромат, твердий, має велику кількість

кристалітних ділянок в аморфній структурі, пластичність – більше, ніж у карнаубського, але менше, ніж у бджолиного.

На даний час найбільший виробник восків у світі – Німеччина – випускає до 50 тис. т восків на рік, що становить понад 80 % світового виробництва. Гірський віск та його модифікації мають ряд цінних властивостей (волого- та кислотостійкість, низька електропровідність та ін.) і є незамінними при виготовленні захисних композицій для різних покриттів, у паперовій, шкіряній промисловості, у косметичі, медицині, у побутовій хімії та багатьох інших областях.

Вважається, що для прийнятної економічної ефективності процесу сировина повинна мати бітумінозність вище 6–6,5 %. Серед вітчизняних родовищ бурого вугілля таким вимогам відповідає Александрійське буровугільне. Характеристики гірського воску, отриманого у лабораторних умовах з вугілля цього басейну екстракцією бензино-бензольною сумішшю в горизонтальному екстракторі багаторазового занурення наведені в табл. 1.

Таблиця 1 – Характеристики екстрагованого гірського воску і параметри процесу

Показники	Температура екстракції, °C	
	68	70
Режимно-технологічні параметри		
Співвідношення вугілля : розчинник	1 : 5	1 : 6
Час екстракції, хв.	15	20
Характеристика сировини і продукту		
Вміст води в бурому вугіллі, %	12	17
Вихід бітуму з сухого вугілля, %	7,0	8,2
Фракційний склад вугілля, мм	0,2–1,9	0,2–2,5
Вихід воску, % від ресурсу	72	84
Температура краплепадіння, °C	82	84
Кількість неомілованих сполук воску, %	19	20

Технологічний процес отримання восків зводиться до дроблення вугілля до фракції крупністю 0,1–3,5 мм, наступному сушінні до залишкової вологості ~20 %, обробці вугілля розчинником (бензином або бензолом) і відгону розчинника з одержанням цільового товарного продукту. Проекстраговане вугілля після пропарювання може прямувати на брикетування або використовуватись в енергетиці.

Перспективні екстракти можна отримати із попередньо проалкілюваного вугілля. Для бурого вугілля характерна неупорядкованість структури та підвищений вміст кисневмісних функціональних груп. Алкілювання спиртами кисневмісних функціональних груп є ефективним способом руйнування міжмолекулярних взаємодій в органічній масі твердих горючих копалин та збільшення їх розчинності за м'яких умов ведення процесу [8].

Алкілювання вугілля проводиться н-бутанолом у присутності н-гептану та ортофосфорної кислоти ($w=79.9\%$, $\rho=1.626\text{ г/см}^3$) при температурі кипіння суміші 98–

103 °C. По завершенні процесу з вугільної маси, що залишилася, спирто-бензолом (1:1) за методом Грефе, екстрагуються залишкові воски та смоли.

Результаті реального експерименту (5 г вугілля; 69.75 мл н-бутанолу, н-гептану 100 мл, 9.8 % (18.3 мл) ортофосфорної кислоти, тривалість процесу алкілювання 6 год), середній вихід (на горючу масу вугілля) склав: бітумів $\approx 44\%$, восків $\approx 16.7\%$, смол $\approx 27.3\%$ (табл.2). Розбіжність реального експерименту з розрахунковим значенням знаходиться в межах рівня значущості $\alpha = 0.05$.

Таблиця 2 – Результати лабораторного алкілювання

№ експ.	Вміст, %		
	Воски	Смоли	Сумарно бітуму А
1	16,5	27,5	44
2	16,7	27,3	44
3	17	27,3	44,3

У бітумах та їх фракціях, отриманих з алкільованого під впливом ультразвуку бурого вугілля, з найбільшим відносним вмістом ідентифіковані жирні ка-рбонові кислоти представлені у вигляді бутилових етерів. Серед речовин, ідентифікованих у цих фракціях, присутні такі біологічно активні речовини, як: Sugiol – метаболіт рослин, має противірусну та протипухлинну активність; Ferruginol – метаболіт рослин, має протипухлинні властивості, антибактеріальну активність. Деякі дослідники відмічають, що ця речовина демонструє зменшення пухлини товстої кишки, молочної залози, легень та зменшення кількості транс-формованих онкогенами клітин. Behenic alcohol – має противірусну активність; Lupeol – метаболіт рослин, має протипухлинну і протизапальну дію; Betulin – має противірусну активність, властивості анальгетика, протизапальну та проти-пухлинну дію. Також варто зазначити, що елюювання етанолом дозволило витягти ряд фракції з високим відносним вмістом Oleic acid – до 75.8 %, яка також є БАР [9].

Таким чином, доведена можливість отримання буровугільного воску з високим виходом та покращеною якістю, що полягає в попередній обробці бурого вугілля соляною кислотою та подальшому екстрагуванні бензином. За своїми фізико-хімічними характеристиками отриманий віск наближається до рослинних восків, наприклад карнаубського воску. Проте, він значно багатший на біологічно активні речовини.

Серед речовин, ідентифікованих у цих фракціях, присутні такі біологічно активні речовини, як: Sugiol – метаболіт рослин, має противірусну та протипухлинну активність; Ferruginol – метаболіт рослин, має протипухлинні властивості, антибактеріальну активність. Деякі дослідники відмічають, що ця речовина демонструє зменшення пухлини товстої кишки, молочної залози, легень та зменшення кількості трансформованих онкогенами клітин. Behenic alcohol – має противірусну активність; Lupeol – метаболіт рослин, має протипухлинну і протизапальну дію; Betulin – має противірусну активність, властивості анальгетика, протизапальну та протипухлинну дію.

Це останнє робить отриманий екстракт гірського воску перспективною сировиною для фармацевтичної технології, космецевтики та медицини.

Бджолиний віск належить до складних речовин природного походження. Колір і запах воску обумовлюються вмістом у ньому незначних кількостей барвників та ароматичних речовин. Колір і запах воску обумовлюються вмістом у ньому незначних кількостей барвників та ароматичних речовин.

Віск зазвичай забарвлений у жовтий колір, від світло-жовтого та навіть білого до темно-жовтого, коричневого. Іноді зустрічаються сорти воску помаранчевого, зеленого кольору. Колір воску залежить від низки чинників. По-перше, білий віск, що виділяється організмом бджоли, забарвлюється жовтим від розчинення в ньому приполюсної смоли. Фарбувальна речовина прополісної смоли є хризином, який має запах прополісу і жовтий колір. По-друге, жовтий барвник екстрагується з деяких видів перги, стикаючись з якою віск набуває жовтого або помаранчевого забарвлення.

Нормальний бджолиний віск повинен мати приємний медовий запах, який обумовлений присутністю ефрних олій, що переходять у віск із пилку. За запахом різні сорти його відрізняються один від одного. Іноді віск має запах хвої, кмину та інших рослин [10].

До його складу входять: вільні жирні кислоти 13,5–15,0 %; складні ефіри 70,4–74,7 %; насичені вуглеводи 12,5–15,5 %. Вільні жирні кислоти становлять групу ні з чим не пов'язаних жирних кислот. До них відносяться одноосновні насичені кислоти. Кількість вільних жирних кислот, що містяться у воску, зазвичай виражають кислотним числом. Складні ефіри представляють речовини, утворені з жирних кислот та спиртів. Бджолиний віск складається в основному з миристинового ефіру пальмітинової кислоти. До складу складних ефірів, крім пальмітинової кислоти ($C_{16}H_{32}O_2$), що плавиться при 62 °С, входять ще мелісинова ($C_{30}H_{60}O_2$ та інші, а також кислоти олеїнового ряду [11]. На відміну від вільних жирних кислот тут кислоти пов'язані з високомолекулярними одноатомними спиртами, такими, наприклад, як миристиловий (мелісиновий, температура плавлення 87 °С), цериловий (температура плавлення 80 °С), монтановий (температура плавлення 84 °С) [12]. Тому жирні кислоти у складних ефірах втратили свою активність. Зв'язок жирних кислот із спиртами не дуже міцний. При кип'ятінні з лугом складні ефіри омиляються, розкладаються з виділенням солей жирних кислот та одноатомних спиртів.

Кількість складних ефірів у воску виражають показником – ефірним числом, яке разом із кислотним числом надає допомогу в оцінці якості бджолиного воску та розпізнавання його фальсифікації. Ефірним числом називають кількість міліграмів їдкового калію, необхідне для омилення складних ефірів і нейтралізації вільних жирних кислот, що виділилися при цьому, що містяться в г воску.

Вивчення термічних властивостей (плавлення та кристалізація) проводилось за допомогою диференційної скануючої калориметрії (ДСК), а визначення кристалічної структури і наявності кристалічних включень в аморфній масі – за допомогою рентгеноструктурного аналізу (РСА). Отримані дані наведені на рис. 1.

У випадку гірських і природних восків РСА дозволяє виявити наявність кристалічних фаз, визначити їх тип (наприклад, орторомбічний, гексагональний) і оцінити ступінь кристалічності. Це важливо для розуміння їх фізико-хімічних властивостей, таких як температура плавлення, механічна міцність та поведінка при змішуванні з іншими матеріалами. Так, віск із високою кристалічністю має чіткі дифракційні піки, тоді як аморфні компоненти дають розмиті максимуми.

Отримані температури плавлення: гірський віск: 60–80 °С, бджолиний: близько 63 °С, карнаубський: 85 °С. Кристалічна структура: РСА показав часткову кристалічність та розміри кристалітів у всіх досліджених зразків.

Порівняння фізико-хімічних властивостей досліджуваних восків наведено в табл. 1.

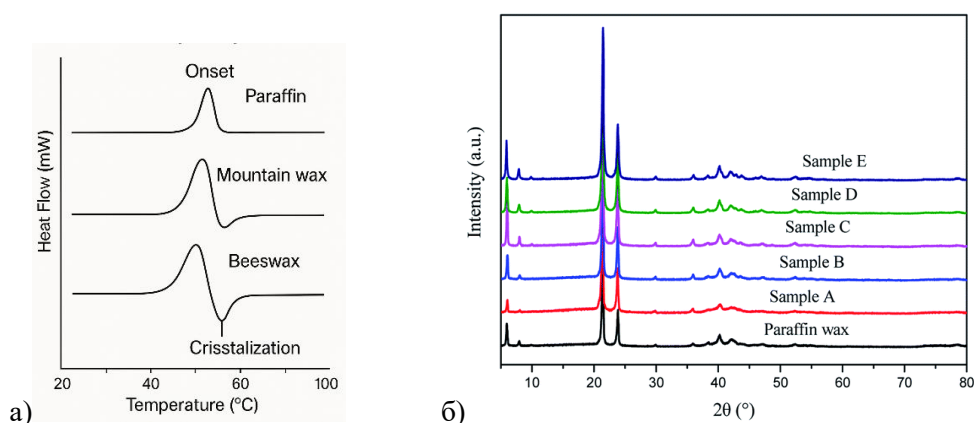


Рисунок 1 – Дані термограми (а) та рентгеноструктурного аналізу (б) досліджуваних восків

Таблиця 1 – Фізико-хімічні властивості досліджуваних восків

Зразки воску	Кислотне число, мг КОН/г	Число омилення	Ефірне число
Бджолиний віск	18	92	74
Гірський віск	52	105	52
Карнаубський віск[6]	4	77	73

Висновки. Для подальшого дослідження і розробки технології створення матеріалів на основі восків для промислового застосування найбільшу цікавість викликали натуральний бджолиний віск та гірський віск, екстрагований з бурого вугілля українських родовищ. Проте, рентабельність використання гірського воску значно нижче через фактичну відсутність в Україні програми комплексної переробки бурого вугілля. Тому він лишається перспективним продуктом, а от бджолиний віск вже зараз може бути використаний як сировина для виробництва.

Бджолиний віск – природний біоматеріал із унікальними бар’єрними, антимікробними та термопластичними властивостями, що робить його перспективним для пакування харчових продуктів. Його хімічний склад забезпечує гідрофобність, механічну міцність і біорозкладність. Віск ефективно поєднується з біополімерами (желатин, хітозан, PLA), утворюючи композитні плівки з покращеними властивостями. В Україні, завдяки розвинутому бджільництву, існує значний потенціал для виробництва воску, який відповідатиме міжнародним стандартам.

Бджолиний віск може бути екологічною альтернативою традиційним пакувальним матеріалам. Його використання здатне зменшити обсяг пластику та створювати функціональні антисептичні покриття.

Література

1. Chaudhary P. et al. Beeswax-based food packaging: A natural alternative. *Food Control*. 2021. 130. 108359. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2021.108359>.

2. Yudina Y. V., Hrubnyk I. M., Hrubnyk M. I., Ohanesian I. G., Baillie L., Mikhlovsky S., Nurzhanova M. A. Development of eco-friendly packaging based on bees products and plant extracts and evaluation of its antibacterial potential. *Journal of Chemistry and Technologies*. 2025. 32(4). P. 958–968. <http://chemistry.dnu.dp.ua/article/view/308049>.

3. Шустов О. О., Белов О. П., Адамчук А. А. Перспективи комплексного освоєння родовищ бурого вугілля України з метою отримання буровугільного воску. *Сучасні технології переробки паливних копалин: тези доп. 6-ї Міжнар. наук.-техн. конф.*, 11–12 квітня 2023 р. Харків : НТУ «ХПІ», 2023. С. 65–72.

4. Програма ООН з навколишнього середовища (ЮНЕП). *Welfare.green*. URL: <https://welfare.green/docs/tips-guides/donori-ta-finansovi-organizacii/programa-onn-z-navkolishnogo-seredovishha-yunep/>.

5. Юдіна Ю. В., Грубник І. М., Соломенний А. М., Єременко Н. Б., Конопольський Д. О., Поліщук М. В. Бджолиний віск як компонент екологічного пакування харчових продуктів у військовому забезпеченні: сучасний стан та перспективи. *Ukrainian Journal of Military Medicine*. 2025. 6(4). С. 189–204. DOI: [https://doi.org/10.46847/ujmm.2025.4\(6\)-189](https://doi.org/10.46847/ujmm.2025.4(6)-189).

6. Віск карнаубський. *Фармацевтична енциклопедія*. URL: <https://www.pharmencyclopedia.com.ua/article/1770/visk-karnaubskij>.

7. Грубник М. І., Владимиренко В. В., Лаврова І. О., Грубник В. І. Технологічні аспекти виробництва гірського воску з бурого вугілля Александрійського родовища з метою отримання сировини для хімічної та фармацевтичної промисловості. *Інтегровані технології та енергозбереження*. 2026. № 1. С. 84–90. DOI: <https://doi.org/10.20998/2078-5364.2026.1.08>.

8. Лаврова І., Грубник М., Грубник В. Деякі технологічні аспекти отримання необробленого гірського воску. *Сучасні технології переробки паливних копалин: тези доп. 8-ї Міжнар. наук.-техн. конф.*, 16–17 квітня 2025 р. Харків : НТУ «ХПІ», 2025. С. 89–90.

9. Грубник М. І., Лаврова І. О., Грубник В. І. Гірський воск з бурого вугілля Александрійського родовища як сировина для отримання біологічно активних речовин. *Автоматизація, електроніка, інформаційно-вимірювальні технології: освіта, наука, практика: матеріали 5-ї Міжнар. наук.-техн. конф.*, 28–29 листопада 2024 р. Харків, 2024. С. 177–178.

10. Віск білий. *Фармацевтична енциклопедія*. URL: <https://www.pharmencyclopedia.com.ua/article/1768/visk-bilij>.

11. Giannola L. I., De Caro V., Rizzo M. C. Preparation of white bees wax microspheres loaded with valproic acid and kinetic study of drug release. *Drug Development and Industrial Pharmacy*. 1995. No. 21.

12. Griffin E. N., Niebergall P. J. Release kinetics of a controlled-release multiparticulate dosage form prepared using a hot-melt fluid bed coating method. *Pharmaceutical Development and Technology*. 1999. No. 4(1).

Bibliography (transliterated)

1. Chaudhary P. et al. Beeswax-based food packaging: A natural alternative. *Food Control*. 2021. 130. 108359. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2021.108359>.

2. Yudina Y. V., Hrubnyk I. M., Hrubnyk M. I., Ohanesian I. G., Baillie L., Mikhlovsky S., Nurzhanova M. A. Development of eco-friendly packaging based on bees products and plant extracts and evaluation of its antibacterial potential. *Journal of Chemistry and Technologies*. 2025. 32(4). P. 958–968. <http://chemistry.dnu.dp.ua/article/view/308049>.

3. Shustov O. O., Bielov O. P., Adamchuk A. A. Perspektyvy kompleksnoho osvoinnia rodovyshch buroho vuhillia Ukrainy z metoiu otrymannia burovuhilnoho vosku. Suchasni tekhnolohii pererobky palnykh kopalyn: tezy dop. 6-yi Mizhnar. nauk.-tekhn. konf., 11–12 kvitnia 2023 r. Kharkiv : NTU «KhPI», 2023. P. 65–72.

4. Prohrama OON z navkolyshnoho seredovyshcha (IuNEP). *Welfare.green*. URL: <https://welfare.green/docs/tips-guides/donori-ta-finansovi-organizacii/programa-oon-z-navkolishnogo-seredovishha-yunep/>.

5. Yudina Yu. V., Hrubnyk I. M., Solomenniy A. M., Yeremenko N. B., Konopolskyi D. O., Polishchuk M. V. Bdzholynyi visk yak komponent ekolohichnoho pakuvannia kharchovykh produktiv u viiskovomu zabezpechenni: suchasnyi stan ta perspektyvy. *Ukrainian Journal of Military Medicine*. 2025. 6(4). P. 189–204. DOI: [https://doi.org/10.46847/ujmm.2025.4\(6\)-189](https://doi.org/10.46847/ujmm.2025.4(6)-189).

6. Visk karnaubskiy. *Farmatsevtichna entsyklopediia*. URL: <https://www.pharmencyclopedia.com.ua/article/1770/visk-karnaubskij>.

7. Hrubnyk M. I., Vladymyrenko V. V., Lavrova I. O., Hrubnyk V. I. Tekhnolohichni aspekty vyrobnytstva hirskeho vosku z buroho vuhillia Aleksandriiskoho rodovyshcha z metoiu otrymannia syrovyny dlia khimichnoi ta farmatsevtichnoi promyslovosti. *Intehrovani tekhnolohii ta enerhozbezrezhennia*. 2026. No. 1. P. 84–90. DOI: <https://doi.org/10.20998/2078-5364.2026.1.08>.

8. Lavrova I., Hrubnyk M., Hrubnyk V. Deiaki tekhnolohichni aspekty otrymannia neobrobenoho hirskeho vosku. Suchasni tekhnolohii pererobky palnykh kopalyn: tezy dop. 8-yi Mizhnar. nauk.-tekhn. konf., 16–17 kvitnia 2025 r. Kharkiv : NTU «KhPI», 2025. P. 89–90.

9. Hrubnyk M. I., Lavrova I. O., Hrubnyk V. I. Hirskiy vosk z buroho vuhillia Aleksandriiskoho rodovyshcha yak syrovyna dlia otrymannia biolohichno aktyvnykh rechovyn. *Avtomatyzatsiia, elektronika, informatsiino-vymiriuvalni tekhnolohii: osvita, nauka, praktyka: materialy 5-yi Mizhnar. nauk.-tekhn. konf., 28–29 lystopada 2024 r. Kharkiv, 2024*. P. 177–178.

10. Visk bilyi. *Farmatsevtichna entsyklopediia*. URL: <https://www.pharmencyclopedia.com.ua/article/1768/visk-bilij>.

11. Giannola L. I., De Caro V., Rizzo M. C. Preparation of white bees wax microspheres loaded with valproic acid and kinetic study of drug release. *Drug Development and Industrial Pharmacy*. 1995. No. 21.

12. Griffin E. N., Niebergall P. J. Release kinetics of a controlled-release multiparticulate dosage form prepared using a hot-melt fluid bed coating method. *Pharmaceutical Development and Technology*. 1999. No. 4(1).

УДК 665.6

І. О. Лаврова, канд. техн. наук, доцент, М. І. Грубник, аспірант, В. В. Володимиренко, phd, асистент, А. Г. Корягін, канд. хім. наук, доцент,
С. І. Авіна, канд. техн. наук, доцент

ПРИРОДНІ ВОСКИ ЯК СИРОВИНА ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА ПРИРОДНИХ, ЕКОЛОГІЧНО БЕЗПЕЧНИХ ТА БІОРОЗКЛАДНИХ ПАКУВАЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ

У даній роботі наведено результати аналізу літературних джерел та проведених досліджень щодо можливостей використання природних восків у композитах для про-

сочування пакувальних матеріалів з метою підвищення їх споживацьких якостей – збільшення антимікробної та захисної дії.

Актуальність теми досліджень обумовлена світовими втратами продуктів харчування, спричиненими мікробіологічним псуванням. Антимікробна упаковка харчових продуктів має на меті зменшити або пригнічити ріст мікроорганізмів, що спричиняють псування, або патогенів, які можуть бути присутніми в самому продукті або пакувальному матеріалі. Необхідно обмежити ріст мікробів на всіх етапах — від транспортування до кінцевого споживання. Цей тип упаковки досяг значного прогресу за останні роки завдяки зростаючому попиту на безпеку харчових продуктів, гігієну та збереження.

У роботі досліджено фізико-хімічні та технологічні властивості трьох природних восків з точки зору можливості їх використання в композитах для пакувальних матеріалів. Вивчено їх хімічний склад на предмет наявності біогенних речовин та сполук, що носять явно виражений антибактеріальний характер.

Доведено, що найбільш перспективними в цьому сенсі виявились бджолиний віск та екстрактивний гірський віск. Проте, з техніко-економічних міркувань (а саме через фактичну відсутність промислового виробництва гірського воску), перевагу слід віддати бджолиному воску. Це природний біоматеріал із унікальними бар'єрними, антимікробними та термопластичними властивостями, що робить його перспективним для пакування харчових продуктів. Його хімічний склад забезпечує гідрофобність, механічну міцність і біорозкладність. Віск ефективно поєднується з біополімерами (желатин, хітозан, PLA), утворюючи композитні плівки з покращеними властивостями. В Україні, завдяки розвинутому бджільництву, існує значний потенціал для виробництва воску, який відповідатиме міжнародним стандартам.

Бджолиний віск може бути екологічною альтернативою традиційним пакувальним матеріалам. Його використання здатне зменшити обсяг використання синтетичних полімерів та створювати функціональні антисептичні покриття.

Ключові слова: віск бджолиний, гірський віск, карнаубський віск, композити, екстракти, біологічно активні речовини, антибактеріальна дія.

I. O. Lavrova, M. I. Hrubnyk, V. V. Vladymyrenko, A. G. Koriahin, S. I. Avina

NATURAL WAXES AS RAW MATERIALS FOR THE PRODUCTION OF NATURAL, ECOLOGICALLY SAFE AND BIODEGRADABLE PACKAGING MATERIALS

In this paper, the results of an analysis of literature sources and conducted studies regarding the possibilities of using natural waxes in composites for the impregnation of packaging materials are presented, with the aim of increasing their consumer qualities – enhancing antimicrobial and protective action.

The relevance of the research topic is determined by global food losses caused by microbiological spoilage. Antimicrobial food packaging aims to reduce or suppress the growth of microorganisms that cause spoilage, or pathogens that may be present in the product itself or the packaging material. It is necessary to limit microbial growth at all stages – from transportation to final consumption. This type of packaging has achieved significant progress in recent years due to the growing demand for food safety, hygiene, and preservation.

In the work, the physicochemical and technological properties of three natural waxes were investigated from the perspective of the possibility of their use in composites for packaging materials. Their chemical composition was studied for the presence of biogenic substances and compounds that carry a clearly expressed antibacterial character.

It has been proven that the most promising in this sense turned out to be beeswax and extractive mountain wax (montan wax). However, for technical and economic reasons (namely, due to the actual absence of industrial production of mountain wax), preference should be given to beeswax. It is a natural biomaterial with unique barrier, antimicrobial, and thermoplastic properties, which makes it promising for food packaging. Its chemical composition provides hydrophobicity, mechanical strength, and biodegradability. The wax effectively combines with biopolymers (gelatin, chitosan, PLA), forming composite films with improved properties. In Ukraine, thanks to developed beekeeping, there is a significant potential for the production of wax that will meet international standards.

Beeswax can be an ecological alternative to traditional packaging materials. Its use is capable of reducing the volume of synthetic polymer usage and creating functional antiseptic coatings.

Keywords: beeswax, mountain wax, carnauba wax, composites, extracts, biologically active substances, antibacterial effect.

Отримано редколегією 24.02.2026

Лаврова Інна Олегівна (Inna Lavrova), канд. техн. наук, доцент Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», <https://orcid.org/0000-0002-3970-1627>;

Грубник Михайло Ігорович (Mykhailo Hrubnyk), аспірант Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», <https://orcid.org/0009-0007-1191-4552>;

Владимиренко Владислава Віталіївна (Vladislava Vladymyrenko), PhD, асистент Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», <https://orcid.org/0009-0009-9448-4010>;

Корягін Андрій Геннадійович (Andrii Koriahin), канд. хім. наук, доцент Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», <https://orcid.org/0000-0002-6989-399X>;

Авіна Світлана Іванівна (Svitlana Avina), канд. техн. наук, доцент Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», <https://orcid.org/0000-0002-5037-8576>.

«ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ»

Щоквартальний науково-практичний журнал

Редколегією до опублікування приймаються статті, написані **державною мовою**, за наступними науковими напрямками:

- ✓ енергетика та енергозбереження; енерготехнологія енергоємних галузей промисловості; нетрадиційна енергетика; ресурсозбереження; енергетика та навколишнє середовище;
 - ✓ тепловикористовуючі установки; моделювання процесів промислового обладнання; процеси та апарати різних галузей промисловості (хімічної, харчової, медичної та ін.);
 - ✓ застосування ЕОМ в технологічних процесах; автоматизовані системи управління та обробки інформації;
 - ✓ тепло- і масообмінні процеси та обладнання спеціальної техніки; теплові процеси та криогенне устаткування медичного призначення;
 - ✓ електроенергетика; обладнання електростанцій і передача електроенергії;
 - ✓ економічні аспекти енергетики й промислової екології; комерційний інжиніринг, реінжиніринг та технологічний менеджмент,
- а також інших напрямкам на межі різних галузей знань.

Матеріали до опублікування в кожний наступний номер приймаються до 20 числа останнього місяця попереднього кварталу. Рукописи авторам не повертаються.

Електронна версія статті має бути підготовлена у редакторі текстів MS Word for Windows версій 97, XP, 2000 або 2003. Сама стаття має бути роздрукована у 2-х примірниках. До матеріалів мають додаватися експертний висновок про можливість опублікування матеріалів у відкритій пресі; рецензія доктора наук за профілем статті.

ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ СТАТТІ:

Розмір сторінки А4 (210х297 мм); ліве і праве поля – 25 мм, верхнє і нижнє – 30 мм; рекомендований шрифт Times New Roman Суг; розмір шрифту – 12; міжрядковий інтервал – 1.

ПОРЯДОК РОЗМІЩЕННЯ МАТЕРІАЛУ:

- безпосередньо під верхньою межею зліва ВЕЛИКИМИ ЛІТЕРАМИ друкується УДК статті;
- пропустивши один рядок, по центру друкуються ініціали та прізвища авторів, їх науковий ступінь та звання;
- пропустивши один рядок, по центру напівжирним шрифтом ВЕЛИКИМИ ЛІТЕРАМИ друкується назва статті;
- нижче, пропустивши одну строку, друкується назва організації, де працюють автори статті;
- після – розміщуються ключові слова;
- пропускається один рядок і з абзацу (1,25 см) друкується основний текст, відформатований по ширині сторінки;
- перед і після формул і рівнянь має бути відстань в один порожній рядок до тексту з інтервалом 1;
- формули і рівняння мають бути вирівняні по центру;
- номери формул і рівнянь повинні бути вирівняні по правому краю;
- розмір шрифту формул і рівнянь для основного тексту – 12 пт.;
- рисунки, схеми і графіки мають бути виконані в чорно-білому зображенні;
- пропустивши один рядок, подається список літератури, оформлений відповідно до вимог ДСТУ 8302:2015. Список Використаної літератури експериментальної (оригінальної) статті має містити не менше ніж 12 джерел (оптимально – 20–40), оглядової – від 50 джерел, серед яких українськомовних – не більш як 30 %.
- далі розміщується транслітерація списку літератури;
- у кінці статті двома мовами (українська та англійська) мають бути надруковані УДК, автори, назва і анотація. Мінімальна кількість символів кожної анотації – 1800 знаків.

Окремо в редколегію подаються відомості про авторів з їх адресами Email та ORCID.

СТАТТІ, ОФОРМЛЕНІ НЕ ВІДПОВІДНО ДО ВИМОГ, РЕДКОЛЕГІЯ НЕ РОЗГЛЯДАЄ ТА НЕ РОЗМІЩУЄ У ЖУРНАЛІ

АДРЕСА РЕДКОЛЕГІЇ

Україна, 61002,

Харків-2, вул. Кирпичова, 2, НТУ «ХПІ», редколегія журналу «Інтегровані технології та енергозбереження»,
технічний редактор: к.техн.н., професор Горбунов К.О.

Тел. (057) 707-69-58.

Факс (057) 720-22-95.

Email: gor.kona2016@gmail.com

Наукове видання

Щоквартальний науково-практичний журнал

ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

2'2026

Технічний редактор *К. О. Горбунов*

Підп. до друку 04.05.2026 р. Формат 60 × 84 1/8. Папір офсетний.
Riso-друк. Гарнітура Таймс. Ум. друк. арк. 9,8. Наклад 300 пр. 1-й з-д 1–20.
Зам. № . Ціна договірна.

Видавець і виготовлювач
Видавничий центр НТУ «ХПІ»,
вул. Кирпичова, 2, м. Харків-2, 61002

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 5478 від 21.08.2017 р.