

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
СХІДНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
імені ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ



# **В І С Н И К**

**Східноукраїнського  
національного університету  
імені ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ**

**№ 5 (291)  
2025**

**НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ**

Київ 2025

# ВІСНИК

СХІДНОУКРАЇНСЬКОГО  
НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ  
ІМЕНІ ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ

**№ 5 (291) 2025**

НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ

ЗАСНОВАНО У 1996 РОЦІ

ВИХІД З ДРУКУ - ДВНАДЦЯТЬ РАЗІВ НА РІК

Засновник

Східноукраїнський національний університет  
імені Володимира Даля

Журнал зареєстровано

в Міністерстві юстиції України

Свідоцтво про державну реєстрацію

серія КВ № 15607-4079ПР

від 18.08.2009 р.

# VISNIK

OF THE VOLODYMYR DAHL EAST  
UKRAINIAN NATIONAL UNIVERSITY

**№ 5 (291) 2025**

THE SCIENTIFIC JOURNAL

WAS FOUNDED IN 1996

IT IS ISSUED TWELVE TIMES A YEAR

Founder

Volodymyr Dahl East Ukrainian National  
University

Registered by the Ministry

of Justice of Ukraine

Registration Certificate

KB № 15607-4079ПР

dated 18.08.2009

Журнал включено до Переліків наукових фахових видань України (Наказ МОН № 886 02.07.2020 р.), (Наказ МОН №1188 24.09.2020 р.), (Наказ МОН №157 від 09.02.2021 р.) в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук з технічних (122, 131, 132, 133, 141, 151, 161, 273) та економічних (051, 073, 075) наук відповідно.

Журнал включено до Міжнародної наукометричної бази даних Index Copernicus International (ICV 2018: 59.34).

ISSN 1998-7927(print)

ISSN 2664-6498 (online)

## Головна редакційна колегія:

*Поркуян О.В.*, докт. техн. наук (голова редакційної колегії),

Галгаш Р.А., докт. екон. наук, (заступник голови  
редакційної колегії),

Кудрявцев С.О., канд. техн. наук, (заступник голови  
редакційної колегії),

Білобородова Т.О. канд. техн. наук,

Глікіна І.М., докт. техн. наук,

Грицюк В.Ю., канд. техн. наук,

Д'яченко Ю.Ю., докт. екон. наук,

Ковтанець М.В., канд. техн. наук,

Кравченко К.О., канд. техн. наук,

Лорія М.Г., докт. техн. наук,

Могіла В.І., докт. техн. наук,

Носко О.П., канд. техн. наук,

Проказа О.І., канд. техн. наук,

Семененко І.М., докт. екон. наук,

Сергієнко О.В., канд. техн. наук,

Скарга-Бандурова І.С., докт. техн. наук,

Целіщев О. Б., докт. техн. наук

**Відповідальний за випуск: д.т.н., професор Лорія М.Г.**

Рекомендовано до друку Вченою радою Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля (Протокол № 10 від 30 травня 2025 р.)

Матеріали номера друкуються мовою оригіналу.

© Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, 2025

© Volodymyr Dahl East Ukrainian National University, 2025

---

---

## З М І С Т

### Спеціальність 122

<b>Yuchuzhanin V.V., Yuchuzhanin O.V.</b> INTEGRATED APPROACH TO DIAGNOSING COMPLEX TECHNICAL SYSTEMS: EXPERIMENTAL VALIDATION AND MULTIDIMENSIONAL EFFICIENCY ASSESSMENT.....	5
<b>Могильний Г.А., Донченко В.Ю., Швець І.М., Донченко С.М., Кузнецов В.С.</b> КОНЦЕПТУАЛЬНА МОДЕЛЬ ІНФОРМАЦІЙНОЇ БЕЗПЕКИ НАВЧАЛЬНИХ КОМП'ЮТЕРНИХ ЛАБОРАТОРІЙ.....	18
<b>Ратов Д.В.</b> ІНТЕГРАЦІЯ WEB-СЕРВІСУ З СОЦІАЛЬНОЮ МЕРЕЖЕЮ .....	29

### Спеціальність 131

<b>Кавецький О.І., Лозінський Д.О.</b> ОПТИМІЗАЦІЯ РОБОТИ БАГАТОПОТОКОВОГО ЕЛЕКТРОГІДРАВЛІЧНОГО ПРИВОДУ МЕТОДАМИ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ .....	36
---	----

### Спеціальність 151

<b>Моркун В.С., Моркун Н.В., Бобров Є.Ю., Грищенко Я.О.</b> МОДЕЛЮВАННЯ БАГАТОКОНТУРНОЇ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОГО КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ БУРІННЯ СВЕРДЛОВИН НА ОСНОВІ ПІД КОНТРОЛЕРІВ.....	45
<b>Поркуян О.В., Самойлова Ж.Г.</b> ВПЛИВ ПАРАМЕТРА SPREAD РАДІАЛЬНО-БАЗИСНИХ МЕРЕЖ НА АПРОКСИМАЦІЮ ОСНОВНИХ КАНАЛІВ КЕРУВАННЯ РЕАКТОРУ СИНТЕЗУ ОЦТОВОЇ КИСЛОТИ .....	53

### Спеціальність 161

<b>Baklan D.V., Myronyuk O.M., Vilousova A.O., Vanagas E.</b> STUDY OF THE INFLUENCE OF LASER RADIATION ADSORBERS ON THE ABLATION OF CARBON FIBER-REINFORCED PLASTIC BY FEMTOSECOND LASER PULSES.....	59
<b>Маковський Д.П., Миронюк С.В.</b> РІДИННО-ВІДШТОВХУВАЛЬНІ ІНФУЗОВАНІ ПОВЕРХНІ: ОГЛЯД СУЧАСНИХ ТЕНДЕНЦІЙ ТА ПЕРСПЕКТИВ.....	64
<b>Слободянюк В.П., Кудрявцев С.О., Целішев О.Б., Лорія М.Г.</b> ВИЗНАЧЕННЯ МОЖЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ХОЛОДНОЇ ПЛАЗМИ ДЛЯ ОКИСЛЕННЯ АТМОСФЕРНОГО АЗОТУ В ОКСИДИ НІТРОГЕНУ ТА ВПЛИВУ СИЛИ СТРУМУ ЧЕРЕЗ УСТАНОВКУ НА ПРОЦЕС .....	74
<b>Страшенко В.К., Миронюк О.В.</b> МЕТОД ГРАДУЮВАННЯ ПРОБНИХ РІДИН ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ПОВЕРХНЕВОЇ ЕНЕРГІЇ МЕТОДОМ ОУЕНСА-ВЕНДТА .....	88
<b>Шмиголь С.О., Столяренко Г.С.</b> СУЧАСНІ ПІДХОДИ ДО УТИЛІЗАЦІЇ ШЛАМОВИХ ВІДХОДІВ ГАЛЬВАНІЧНИХ ВИРОБНИЦТВ ЯК КАТАЛІЗАТОРІВ ОЧИЩЕННЯ ГАЗОВИХ ПОТОКІВ: ОГЛЯД ТЕХНОЛОГІЙ І ПЕРСПЕКТИВ .....	95
<b>Yong Z., Baklan D.V.</b> A REVIEW OF FABRICATION TECHNIQUES FOR SUPERHYDROPHOBIC COATINGS.....	109

---



---

## CONTENTS

### Speciality 122

<b>Vychuzhanin V.V., Vychuzhanin O.V.</b>	
INTEGRATED APPROACH TO DIAGNOSING COMPLEX TECHNICAL SYSTEMS: EXPERIMENTAL VALIDATION AND MULTIDIMENSIONAL EFFICIENCY ASSESSMENT.....	5
<b>Mohylnyi H.A., Donchenko V.U., Shvets I. M., Donchenko S.M., Kuznetsov V.S.</b>	
CONCEPTUAL MODEL OF INFORMATION SECURITY OF EDUCATIONAL COMPUTER LABORATORIES .....	18
<b>Ratov D.V.</b>	
WEB SERVICE INTEGRATION WITH SOCIAL NETWORK .....	29

### Speciality 131

<b>Kavetskyi O.I., Lozinskyi D.O.</b>	
OPTIMIZATION OF MULTI-FLOW ELECTROHYDRAULIC DRIVE OPERATION USING ARTIFICIAL INTELLIGENCE METHODS .....	36

### Speciality 151

<b>Morkun V.S., Morkun N.V., Bobrov E.Y., Hryshchenko Y.O.</b>	
MODELING OF A MULTI-CIRCUIT SYSTEM FOR AUTOMATED CONTROL OF THE WELL DRILLING PROCESS BASED ON SUBCONTROLLERS.....	45
<b>Porkuian O.V., Samojlova Zh.G.</b>	
INFLUENCE OF THE SPREAD PARAMETER OF RADIAL-BASE NETWORKS ON THE APPROXIMATION OF THE MAIN CONTROL CHANNELS OF AN ACETIC ACID SYNTHESIS REACTOR .....	53

### Speciality 161

<b>Baklan D.V., Myronyuk O.M., Bilousova A.O., Vanagas E.</b>	
STUDY OF THE INFLUENCE OF LASER RADIATION ADSORBERS ON THE ABLATION OF CARBON FIBER-REINFORCED PLASTIC BY FEMTOSECOND LASER PULSES .....	59
<b>Makovkyi D.P., Myronyuk O.V.</b>	
LIQUID-REPELLENT INFUSED SURFACES: A REVIEW OF CURRENT TRENDS AND PROSPECTS.....	64
<b>Slobodyanyuk V.P., Kudryavtsev S.O., Tselishchev O.B., Loria M.G.</b>	
DETERMINATION OF THE POSSIBILITY OF USING COLD PLASMA FOR THE OXIDATION OF ATMOSPHERIC NITROGEN INTO NITROGEN OXIDES AND THE INFLUENCE OF ACTIVATING SUBSTANCES ON THE PROCESS.....	74
<b>Strashenko V.K., Myroniuk O.V.</b>	
CALIBRATION METHOD FOR TEST LIQUIDS FOR MEASURING SURFACE ENERGY BY THE OWENS-WENDT METHOD .....	88
<b>Shmyhol S.O., Stoliarenko H.S.</b>	
MODERN APPROACHES TO THE UTILISATION OF SLUDGE WASTE FROM ELECTROPLATING AS A CATALYST FOR GAS FLOW PURIFICATION: A REVIEW OF TECHNOLOGIES AND PROSPECTS .....	95
<b>Yong Z., Baklan D.V.</b>	
A REVIEW OF FABRICATION TECHNIQUES FOR SUPERHYDROPHOBIC COATINGS.....	109

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-291-5-5-17>

UDC 004.03

## INTEGRATED APPROACH TO DIAGNOSING COMPLEX TECHNICAL SYSTEMS: EXPERIMENTAL VALIDATION AND MULTIDIMENSIONAL EFFICIENCY ASSESSMENT

Vychuzhanin V.V., Vychuzhanin O.V.

## ІНТЕГРОВАНІЙ ПІДХІД ДО ДІАГНОСТИКИ СКЛАДНИХ ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ: ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ВАЛІДАЦІЯ ТА БАГАТОВИМІРНА ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ

Вичужанін В.В., Вичужанін О.В.

*This paper presents a comprehensive experimental validation of an integrated approach to the diagnosis of the technical condition (TC) of complex technical systems (CTS), using ship power plants (SPPs) as an example. The proposed methodology combines precedent-based logic (Case Based Reasoning – CBR), probabilistic forecasting using Bayesian networks and Markov chains, and simulation modeling of degradation scenarios and cascading failures. Testing was conducted under three scenarios: normal operating mode, high-load mode, and a scenario with limited data availability, which enabled a thorough assessment of the algorithms' adaptability and resilience to changing operational factors. Classical binary classification metrics (Accuracy, Precision, Recall, and F1 score) were used for quantitative evaluation of diagnostic quality, along with newly introduced extended indicators: weighted accuracy (WAcc), F1 score accounting for the criticality of component failures (FIW), recall weighted by failure risk (RecallR), cost-adjusted precision for false alarms (PrecisionC), and the Diagnostic Stability Index (DSI). The results of the multi-scenario experiment showed a consistent improvement in all major indicators: Accuracy increased from 78.5% to 85.3%, Precision from 75.2% to 83.1%, Recall from 80.1% to 87.6%, F1 score from 77.5% to 85.3%, RecallR reached 91.0%, and DSI was 0.983. Five-fold cross-validation yielded a standard deviation of F1 score at 2.2%, confirming the reproducibility and reliability of the proposed method for experimental testing of the integrated diagnostic approach for CTS. The implementation of a cyclic procedure "simulation, probabilities, CBR adaptation" significantly reduced the number of false alarms and missed critical failures in SPP equipment. The practical significance of the approach lies in its potential*

*integration into SCADA/PMS systems of marine CTS and ground power stations, facilitating a shift to intelligent predictive maintenance, thereby reducing unplanned downtime, lowering costs, and enhancing equipment reliability. Future research prospects include increasing the adaptability of the approach, expanding the precedent base, and developing tools for automated processing of heterogeneous data.*

**Keywords:** *predictive diagnostics, Bayesian networks, CBR adaptation, failure simulation modeling, risk-oriented metrics, diagnostic stability, intelligent maintenance*

**Introduction.** In modern CTS, such as ship power plants SPP, issues of reliability and timely detection of equipment failures are critically important for ensuring operational safety and optimizing maintenance costs [1, 2]. Existing intelligent approaches to the diagnosis of the technical condition of CTS traditionally rely either on CBR, which enables the use of accumulated experience from similar incidents, or on probabilistic models (Bayesian networks and Markov chains), which account for uncertainty and the dynamics of failure development in equipment components, or on simulation modeling, which generates degradation scenarios for components. However, the application of each of these methods individually is often insufficient for complex systems with cascading failure effects [3, 4].

In response to these limitations, the field of hybrid and integrated models for diagnosis and

prognosis of the TS of complex systems, combining the advantages of different methodological blocks, has been actively developing in recent years. A systematic review of hybrid methods shows that a properly designed combination of CBR, probabilistic models, and simulation modeling can yield a synergistic effect, improving the accuracy of diagnostics and predictions of equipment TC [5]. Researchers Nikpour & Aamodt [6] introduced the BNCreek system, which combines CBR with a Bayesian network for fault diagnosis of CTS equipment under uncertainty. However, simulation modeling was not included, nor was a multi-scenario experiment conducted, and the system's performance evaluation was limited to comparisons with expert assessments without formal metrics such as Precision/Recall/F1. Yang et al. [7] integrated CBR and Bayesian Networks for diagnosis and prognosis of the TC of complex systems, with validation based on real sensor data. However, their integration of CBR and Bayesian Networks did not involve Markov chains, and the simulation did not explore cascading equipment failures. A multidimensional evaluation of diagnostic and prognostic metrics was also not performed. Soleimani et al. [8] developed a combined HMM (Hidden Markov Model a statistical model used for analyzing sequences where the system is described as having hidden states that transition with certain probabilities) for equipment failure detection and a Bayesian Network for root cause identification. This approach proved effective for fault diagnostics using an automotive system example. However, the authors did not use CBR, and their diagnostic system lacked a simulation module. The experiment covered only a single application domain. El-Awady, Ahmed & Ponnambalam, Kumaraswamy [9] proposed Simulation Supported Bayesian Networks (SSBN) and Markov Chain Simulation Supported BNs (MCSSBN) for analyzing equipment failures in complex networks through simulation and probabilistic analysis. SSBN aims to improve the accuracy of probabilistic models through more realistic and variable scenarios. MCSSBN accounts for the dynamic changes in equipment TS over time, which is particularly important for diagnosing and predicting equipment degradation. However, the authors did not include a CBR component in their development, did not conduct experimental validation of SSBN and MCSSBN for diagnosing equipment failures in complex technical systems under various emergency scenarios, and did not employ diverse diagnostic accuracy metrics.

In their review, Zhong et al. [10] examined the application of digital twins in predictive maintenance of CTS equipment, including systems used in shipbuilding. However, as a review article, it did not present experimental implementations of the integration of CBR, probabilistic models, and simulation modeling. A comprehensive review of Predictive Maintenance (PdM) methods for the maritime industry, including ML algorithms for data processing, diagnostics, and failure forecasting, was provided by Kalafatelis et al. [11]. A drawback of this theoretical review is the absence of a practical implementation of an integrated method. The authors also did not consider CBR or Markov simulations. Emre Özaydın et al. [12] used a Bayesian Network approach for analyzing equipment failures on ships. The resulting data were compared with historical data, with no focus on post-failure analysis. A CBR block was not used, and no failure prediction simulation was conducted. Michail Cheliotis et al. [13] proposed a framework for diagnosing equipment failures in CTS based on operational data and failure probabilities, supported by ML algorithms. Their development did not include a CBR database or simulation scenarios of CTS equipment failures. Diagnostic accuracy was assessed using only a single metric, and no multi-scenario validation of failure diagnostic accuracy was performed.

Despite the presence of these studies, there remains a lack of experimental verifications of hybrid approaches specifically applied to ship-based CTS using multidimensional metrics (Accuracy, Precision, Recall, F1 score). Existing reviews either cover the general theory of hybridization or focus on individual technological components (digital twin, Bayesian networks), but do not provide a comprehensive analysis of the synergy of all three components within a single experimental case.

#### **Purpose and objectives of experimental testing**

The purpose of this article is to organize and conduct multi-scenario experimental testing of an integrated method for diagnostics and prognostics of TC in complex systems, using the example of an SPP. The testing employs multidimensional quality metrics - Accuracy, Precision, Recall, and F1 Score - which enable: quantitative confirmation of the synergistic effect resulting from the integration of CBR, probabilistic models, and simulation modeling; analysis of the method's robustness under various operational modes (normal mode, increased loads, incomplete data); development of practical recommendations for implementation in

diagnostics and prognostics systems of complex technical systems for various applications.

Within the integrated approach to diagnostics and prognostics of TC SPP technical systems, an adaptive mechanism for CBR decision correction is implemented. This mechanism combines three information sources: probabilistic forecasting (Bayesian networks and Markov chains) – for estimating current and future probabilities of component failures; Remaining Useful Life (RUL) prediction based on statistical models (MAE/RMSE) that refine the expected time to failure; simulation modeling – for generating degradation and cascading failure scenarios, allowing CBR decisions to be adjusted by accounting for potential nonlinear interactions between system nodes. At each diagnostic cycle, the CBR core receives updated failure probability estimates and scenarios from the probabilistic models and the simulator, then dynamically recalculates feature weights and refines the selection of similar cases. This approach ensures more accurate and robust diagnostics, even under changing operational factors and incomplete data.

The main testing objectives include: evaluating the impact of integrating the adaptive mechanism into the CBR diagnostic structure, which leverages probabilistic forecasting and RUL analysis; analyzing the influence of probabilistic methods (Bayesian networks, Markov processes) on the accuracy of technical state predictions and failure probabilities; determining the contribution of simulation modeling to the accuracy of equipment failure forecasting, including assessing how cascading effects influence prediction accuracy; comparing various method combinations and evaluating their effectiveness based on key failure diagnostics accuracy metrics.

Real failure data is used for comparison. The testing is conducted on a simulation model of the SPP, which includes: historical failure data (from the OREDA – Offshore Reliability Data database [14]); simulated degradation scenarios of components, mimicking different operational modes; Bayesian networks accounting for probabilistic interrelations between component failures; Markov processes applied to predict failure probabilities over time; CBR diagnostic results - conclusions made by the system based on case analysis and decision adaptation; Adjustments based on RUL predictions and cascading failure effects (e.g., failure of one node increases the probability of failure in other equipment nodes); simulation failure data results from the simulation model, where failure of one SPP component can

lead to failures in connected system nodes (cascading effects considered). Testing covers various operational scenarios, including: normal conditions, standard operating mode; accelerated wear, increased loads and harsh operational environments; emergency conditions, unexpected failures and stress impacts on the system.

CBR with adaptation implies not merely using a case base, but dynamically adjusting decisions based on predicted RUL and cascading failure probabilities obtained from probabilistic models. To assess the quality of SPP equipment failure diagnostics, the following accuracy metrics are used: Precision – the proportion of correctly predicted failures among all predicted failures; Recall – the proportion of actual failures that were correctly predicted; F1 Score – the harmonic mean of precision and recall; Accuracy – the total number of correctly classified cases (both failures and non-failures).

The average prediction error of RUL is evaluated using: Mean Absolute Error (MAE) – average absolute error in RUL prediction; Root Mean Square Error (RMSE) – root mean square error, which accounts for large deviations. Analysis of false positives and false negatives includes: False Positive (FP) – incorrect diagnostics where the system wrongly identifies a healthy component as faulty; False Negative (FN) – missed failures where the system fails to predict a failure that actually occurs. A detailed analysis of FP and FN helps improve decision-making algorithms and minimize critical errors. True Positive (TP) – correct prediction of a failure that actually occurs; True Negative (TN) – correct prediction that no failure occurs and indeed none happens.

Several operational testing scenarios were developed, differing in load levels, failure frequency, and operating conditions. This allows for an assessment of the integrated method's robustness and its ability to function correctly under various operating modes.

The diagnostic CBR module is based on a case base of 235 structured cases, which include descriptions of failures, operating conditions, degradation parameters, and the decisions made. The cases were developed with input from industry experts with at least 10 years of experience in EMCS operation and maintenance. Each case was assigned a feature vector, including values of temperature, pressure, vibration, operating time, and failure characteristics of SPP elements, components, and subsystems. The structure of the case base enables efficient similarity-based search using a feature similarity metric, where feature

weights are defined by expert methods and calibrated during preliminary testing.

### Test scenarios for the technical condition of the SPP

To verify the effectiveness of the proposed integrated method for diagnosing and predicting failures of elements, components, and subsystems of the SPP, three main operational test scenarios were developed to simulate various working conditions of the system. These scenarios allow for an assessment of the method's accuracy, robustness, and adaptability under real operating conditions.

Scenario 1. Nominal Mode, in which the SPP operates under normal conditions with typical loads and expected operational parameters. The goal of testing the technical condition of the SPP in this scenario is to verify the baseline level of diagnostic and failure prediction accuracy, as well as to identify possible false positives and missed failures. A full set of diagnostic data is used in this scenario (temperature, pressure, vibration, power – Table 1), and the number of unexpected failures is minimal. Temperature is monitored in the main engine cylinders, oil, and cooling systems. Pressure – in hydraulic and fuel lines. Vibrations – on bearings and shaft lines. Power – at the output of generator and power units. These parameters serve as input features for both the CBR and probabilistic models.

Table 1

**Diagnostic Features of SPP Failures Used in the Integrated Model**

Parameter	Source / Component	Diagnostic Significance
Temperature	Engine cylinders, heat exchangers, oil	Indicator of overheating, early wear
Pressure	Oil system, cooling system	Leaks, blockages, valve malfunctions
Vibration	Shaft lines, bearings, turbines	Mechanical defects, misalignment, wear
Power	Generator sets, main engines	Indirect indicator of failure or efficiency loss

Scenario 2. The operation of the SPP is carried out under increased load conditions, leading to accelerated degradation of key system equipment. The purpose of PPS testing is to assess the method's ability to recognize changes in failure dynamics and adapt to changing operational conditions. A distinctive feature of this scenario is higher temperature, vibration, and load cycles; accelerated

wear of mechanisms; and increased probability of failures.

Scenario 3. Fault diagnosis under conditions of limited information about past incidents (e.g., incomplete system operation data). The purpose of SPP testing is to assess the effectiveness of simulation modeling and the adaptability of CBR in the absence of sufficient historical information. The distinctive feature of this scenario is the artificial exclusion of part of the case base data and the need to test the method's robustness under limited input conditions.

To evaluate the effectiveness of the proposed method, a simulation model of the SPP was developed. During testing, various failure scenarios were generated (normal conditions, accelerated wear, cascading failures); data from OREDA and accumulated CBR knowledge bases were used; and fault diagnostics were performed both with and without CBR solution adaptation. Each scenario includes: a set of input parameters (temperature, pressure, vibration, power, etc.); actual component failures recorded in the database; diagnostic methods used in the scenario (CBR, probabilistic models, simulation modeling); data sources for testing (OREDA, simulation models, limited data sets). Bayesian networks were constructed for each key piece of SPP equipment, taking into account known causal relationships between the equipment's technical state parameters and failure probabilities. The average number of nodes in a network was 7, with the number of arcs ranging from 8 to 15 depending on the complexity of the SPP equipment. Prior failure probabilities were determined based on OREDA data and adjusted during the training phase based on simulation results. To model the temporal evolution of component states, discrete-time Markov chains with 4–6 degradation states were used: "operational", "initial degradation", "moderate degradation", "critical condition", and "failure". Transition probabilities were calculated based on cumulative operational data and fitted using MAE and RMSE metrics on historical time series. Probability updates occurred at each diagnostic cycle based on the principle: "observation, recalculation, forecast".

The fixation of input parameters for the tests is presented in Table 2.

The data presented in Table 2 clearly capture the differences between the system's operational scenarios and highlight the factors influencing component failure diagnostics in SPP subsystems. Since the scenarios are based on real data from OREDA and simulation modeling, the testing methodology becomes more substantiated and

reproducible. The developed scenarios make it possible to verify the robustness of the SPP equipment failure diagnostics method under various operational conditions.

Table 2

**Input Parameters for Testing Various Scenarios**

Testing Scenario	Temperature (°C)	Pressure (bar)	Vibration (m/s <sup>2</sup> )	Data source
<b>Scenario 1 (nominal mode)</b>	80–100	5–8	0.5–1.5	OREDA database + operational data
<b>Scenario 2 (increased loads)</b>	100–120	8–12	1.5–3.0	Simulated high-degradation conditions
<b>Scenario 3 (data deficiency)</b>	90–110	6–9	1.0–2.0	Artificial data limitation (only partial records)

**Evaluation of Accuracy, Precision, Recall, and F1-Score metrics for various methods of diagnosing the technical condition of the SPP**

To quantitatively assess the effectiveness of the developed SPP diagnostics approach, mathematical metrics traditionally used in technical condition diagnostics tasks were applied: Accuracy; Precision; Recall; F1-Score. These indicators are standard in the fields of machine learning and data mining, including for evaluating the quality of binary classification, and allow for objective comparison of different configurations of diagnostic systems.

$$Accuracy = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN};$$

$$Precision = \frac{TP}{TP + FP};$$

$$Recall = \frac{TP}{TP + FN};$$

$$F1 = 2 \cdot \frac{Precision \cdot Recall}{Precision + Recall}$$

The evaluation of metrics was carried out to identify the difference between standard CBR solutions and adjusted results based on probabilistic failure analysis. Dynamic adjustment of probabilities based on the obtained data was used during testing. To assess the effectiveness of the adaptive mechanism, two types of testing were conducted: CBR without adaptation – failure diagnostics was performed solely based on

similarity to past cases, without the use of probabilistic methods; CBR with adaptation – diagnostics were adjusted using Bayesian networks and Markov models, enabling the consideration of cascading failure risks and the remaining useful life of components.

Table 3

**Comparison of diagnostic metrics**

Diagnostic method	Accuracy, %	Precision, %	Recall, %	F1-score, %	MAE (hours)
CBR without adaptation	78.5	75.2	80.1	77.5	12.4
CBR with adaptation	85.3	83.1	87.6	85.3	7.2
Traditional method	72.8	70.3	75.5	72.8	15.6

The analysis of diagnostic metrics in Table 3 confirms that adapting the CBR method using probabilistic models (Bayesian networks and Markov chains) significantly improves diagnostic quality. Improvements are observed across all metrics: classification accuracy increases by more than 6 percentage points compared to the baseline CBR, and the prediction error for remaining useful life is reduced by almost half. Importantly, a balanced ratio between recall and precision is achieved, as reflected in the high F1-score value (85.3%). Traditional methods, which do not use case-based or probabilistic analysis, show poorer performance both in classification accuracy and in predictive capability. This confirms the necessity of transitioning to integrated diagnostic solutions under high uncertainty and complexity conditions of SPPs. Adapting CBR solutions allows for improved diagnostic accuracy and reduced average failure prediction error.

Figure 1 illustrates how diagnostic metrics improve with the addition of probabilistic methods and simulation modeling.

Figure 1 shows a comparison of diagnostic accuracy across various scenarios for three methods: CBR – approximately 0.76; CBR + Probabilistic Models – approximately 0.85; Integrated Approach – approximately 0.90. Pure CBR demonstrates the lowest accuracy (below 0.8), indicating its limited ability to account for probabilistic failure dependencies. The addition of probabilistic models (Bayesian networks, Markov processes) improves diagnostic performance by around 10%, confirming the effectiveness of method combination. The Integrated Approach (CBR + probabilistic models + simulation methods)

achieves the highest accuracy (above 0.9), indicating a synergistic effect from the comprehensive use of methodologies. The metric diagram (Figure 2) further confirms that the proposed integrated approach to diagnosing SPP significantly improves accuracy compared to standalone methods.

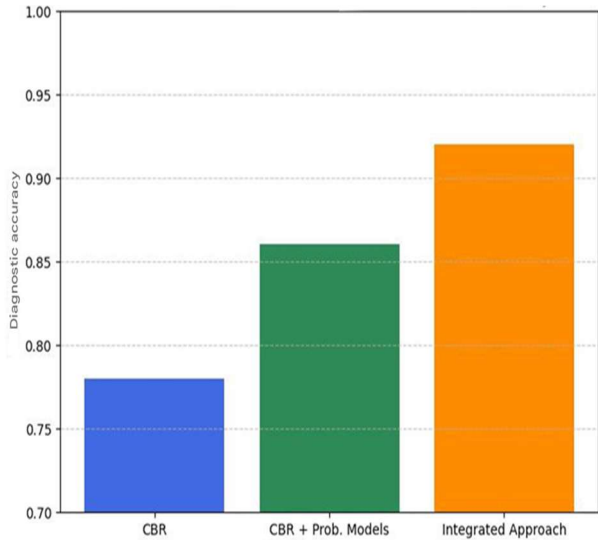


Fig. 1. Comparison of fault diagnosis accuracy metrics across different scenarios

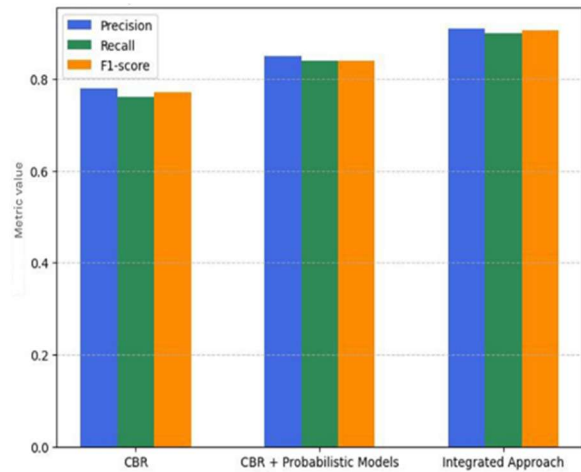


Fig. 2. Diagnostic Accuracy Metrics Chart

Based on Figure 2, the following observations can be made. The CBR method shows the lowest values across all metrics (~0.78), indicating insufficient accuracy and completeness of diagnosis when using a case-based approach alone. CBR + Probabilistic Models (adding probabilistic models) increases all metric values to approximately 0.82–0.84. This indicates a more balanced diagnostic performance that accounts for probabilistic failure dependencies. The Integrated Approach demonstrates the highest results – all metrics exceed

0.88, confirming its effectiveness. It is evident that Precision, Recall, and F1-score are nearly at the same level, indicating a well-balanced diagnostic system. The integration of probabilistic methods with CBR significantly improves fault diagnosis accuracy. Using a comprehensive approach mitigates the limitations of individual methods, resulting in a more reliable diagnosis. The more complex the method (CBR → CBR + Probabilistic Models → Integrated Approach), the higher the diagnostic quality. The diagnostic accuracy metric charts for SPPs (Figures 1 and 2) illustrate how well the model identifies both faults and healthy states.

Figure 3 shows how adaptation affects fault diagnosis accuracy over time. Different SPP subsystems respond differently to adaptation (which is important for analyzing failure probabilities). This is due to cascading effects during SPP operation. A decline in diagnostic accuracy in one system can influence others.

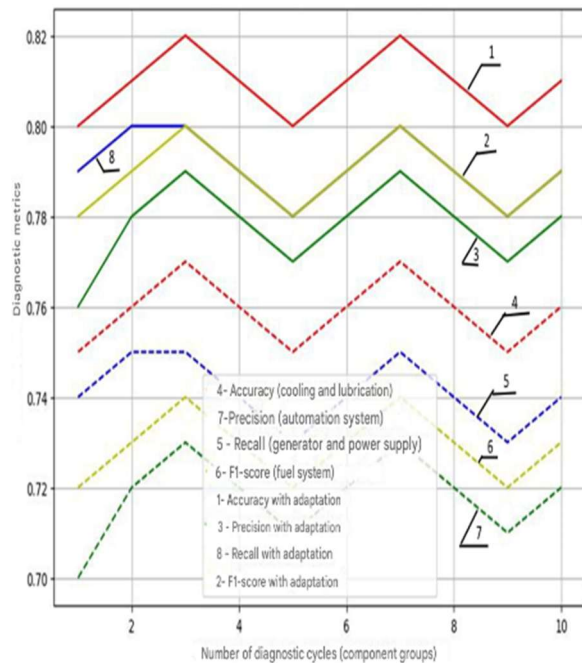


Fig. 3. Diagnostic Accuracy Dynamics with CBR Adaptation

Figure 3 illustrates the dynamics of key diagnostic metrics (Accuracy, Precision, Recall, F1-score) using two approaches: CBR without adaptation; CBR with adaptation (incorporating probabilistic failure prediction). The number of diagnostic cycles refers to the number of consecutive diagnostic checks of SPP equipment. Each fault diagnosis cycle includes the following steps: data collection (temperature, pressure, vibration, etc.); analysis for deviations from normal

operating conditions; identification of potential failures using CBR (without and with adaptation); decision adjustment based on accumulated experience and probabilistic failure prediction. All metrics are higher with adaptation than without, confirming the effectiveness of the adaptive mechanism: Accuracy in the adaptive CBR remains consistently about 5% higher compared to the baseline version; Precision, Recall, and F1-score also show a positive shift of 5–6%, indicating improved fault classification and reduced false positives; the dynamics of metrics without adaptation are less stable, in contrast to the adaptive approach, which demonstrates a smoother and more predictable curve. The adaptive CBR based on probabilistic forecasting enhances the accuracy of diagnosing SPP. The stability of the metrics indicates a better match between diagnostic decisions and actual failures. The use of the adaptive mechanism is recommended to improve diagnostic reliability and reduce forecasting errors.

To assess the stability of SPP equipment fault diagnosis methods under different data splits, cross-validation is used. To quantitatively assess the stability of various components within the diagnostic system, a five-fold cross-validation (CV) was conducted, covering cases from three operational scenarios: nominal mode, increased load, and data deficiency. The table presents the average accuracy (Accuracy) and corresponding standard deviation values for each of the three approaches - basic CBR, probabilistic models, and the integrated solution.

Table 4

**Five-Fold Cross-Validation Results**

Method	Mean accuracy on CV (%)	Standard deviation (%)
CBR	73.5	3.0
Probabilistic networks	79.1	2.8
Integrated method	86.4	2.2

Analysis of Table 4 shows that the integrated approach delivers the highest stability and accuracy among all three configurations: the average Accuracy reached 86.4% with a minimum standard deviation of 2.2%, indicating strong reproducibility of results. Probabilistic models performed slightly worse, achieving 79.1% Accuracy with a standard deviation of 2.8%. The basic CBR mechanism was the least robust, showing an average accuracy of 73.5% and the highest variability ( $\sigma = 3.0\%$ ). These results confirm that the combined use of CBR, probabilistic inference, and simulation provides the

best generalization and robustness across different operational conditions. The difference in accuracy between the integrated method and each of the standalone components ranges from 7 to 13 percentage points, quantifying the synergy achieved by combining these methods. Moreover, the reduction in result dispersion observed in the integrated method compared to CBR confirms that incorporating probabilistic forecasting and simulation not only improves diagnostic accuracy but also enhances the system's resilience to input variability.

To further analyze how different methods perform under cross-validation, an accuracy distribution chart was created. Figure 4 presents the cross-validation results for various fault diagnosis methods.

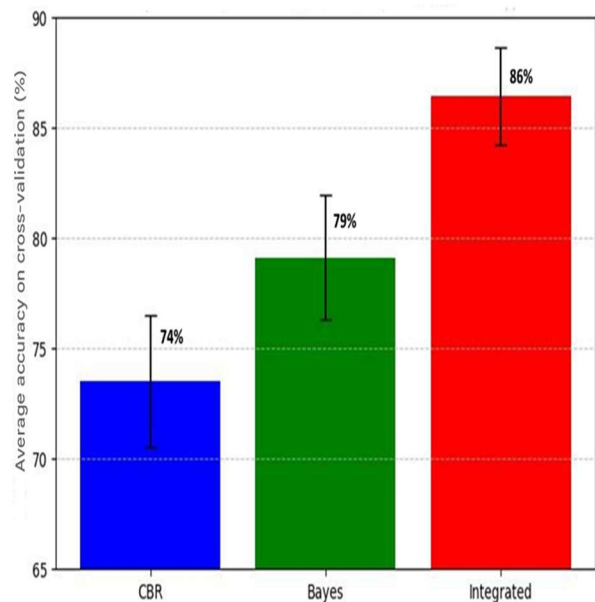


Fig. 4. Cross-validation results for different diagnostic methods

Comparison of methods based on Figure 4: CBR shows the lowest result ( $\approx 74\%$ ) and the highest variability; Bayes (Bayesian method) yields intermediate performance (confidence interval  $\approx 79\%$ ) but with greater error margin than the Integrated method; Integrated approach achieves the highest accuracy ( $\approx 86\%$ ) with the lowest error. Thus, the integrated approach outperforms both CBR and Bayes in terms of accuracy and stability. The Bayesian method demonstrates solid performance, though with a wider error margin. CBR has the lowest accuracy and the highest spread of values.

Cross-validation confirms the reliability of the integrated method. It consistently yields stable results with the smallest standard deviation (2.2%).

The higher variability in CBR without adaptation indicates the method's dependence on the structure of the case base. The use of probabilistic methods reduces error dispersion and enhances diagnostic reliability.

An analysis of the Precision, Recall, F1-score, and Accuracy metrics shows that adaptive CBR methods incorporating probabilistic forecasting reduce diagnostic errors by accounting for the probability distribution of potential failures and adapting to new cases. Compared to classical CBR and Bayesian approaches, the integrated method demonstrates the best balance between precision and recall, as also reflected by the high F1-score. This makes it more reliable for predicting the technical condition of marine power plants, especially under conditions of incomplete information and varying operational factors.

In addition to the standard metrics (Accuracy, Precision, Recall, F1-score) used for quantitative evaluation, additional diagnostic indicators adapted for the specifics of complex technical systems were considered. These indicators provide a more nuanced evaluation by accounting for the severity of different types of errors, the consequences of failures, and the robustness of the model under varying operational modes. While the main part of the study is based on classic binary classification metrics (Accuracy, Precision, Recall, F1-score), in the context of diagnostics and failure prediction in CTS, it is important to consider not only statistical indicators but also the operational significance of different error types. To address this, modified formulas for evaluating diagnostic and prognostic quality were proposed, tailored to the specific needs of CTS and developed within the scope of this research. The modified diagnostic metrics reflect such aspects as the severity of equipment failures, the risk of false negatives, and the resilience of the diagnostic system under varying system operation scenarios.

1. Weighted Accuracy (WAcc). This metric takes into account the varying importance of correctly and incorrectly classified cases:

$$WAcc = \frac{\omega_{TP} \cdot TP + \omega_{TN} \cdot TN}{\omega_{TP} \cdot TP + \omega_{TN} \cdot TN + \omega_{FP} \cdot FP + \omega_{FN} \cdot FN}$$

where  $\omega_{TP}, \omega_{TN}, \omega_{FP}, \omega_{FN}$  are weights reflecting the relative importance of each classification outcome type.

For example,  $\omega_{FN} > \omega_{FP}$ , if a missed failure is more critical than a false alarm.

2. Degradation-Weighted F1 Score (Weighted F1). A modified F1 score is proposed that accounts for the criticality of the monitored component (e.g., a generator or gas turbine engine):

$$F1_W = 2 \cdot \frac{P \cdot R}{P + R}$$

where  $P$  - Precision: the proportion of true positives among all positive predictions;

$R$  - Recall: the proportion of detected failures among all actual failures;

$\omega_d$  - weight coefficient reflecting the degradation importance of the component for which the F1 score is calculated. It is used to increase the impact of failures in critical nodes (e.g., generator or main engine).

3. Risk-Weighted Recall (Recall R):

$$Recall_R = \frac{\sum_i r_i \cdot TP_i}{\sum_i r_i \cdot (TP_i + FN_i)}$$

where  $r_i$  is the risk coefficient of failure for equipment  $i$

4. Cost-Sensitive Precision. False positive alarms (Type I errors) may lead to equipment shutdowns, financial losses, and decreased trust in the diagnostic system:

$$Precision_C = \frac{TP}{TP + c_{FP} \cdot FP}$$

where  $c_{FP}$  is the cost of a single false positive (can be defined by expert assessment).

5. Diagnostic Stability Index (DSI). A metric that reflects the model's sensitivity to changes in operating conditions:

$$DSI = 1 - \frac{\sigma_{F1}}{\bar{F1}}$$

where  $\bar{F1}$  is the average F1 score across different scenarios (e.g., normal mode, overload, data shortage)

$\sigma_{F1}$  is the standard deviation of F1 scores between scenarios.

The closer the DSI is to 1, the more stable the diagnostic model is.

Table 5 demonstrates not only the quantitative superiority of the integrated diagnostic system (which includes CBR, probabilistic models, and simulation modeling) over the simplified configuration, but also qualitatively different improvements when using modified metrics. In

particular, while the standard F1 score increases by 7.8 percentage points (from 77.5% to 85.3%), the modified F1-W - which accounts for the criticality of diagnosed components - shows a 14.9 percentage point increase (from 74.2% to 89.1%).

Table 5

**Diagnostic Performance Evaluation Results Using Basic and Extended Metrics**

Metric	Without adaptation	With adaptation	Comment
F1 score (%)	77.5	85.3	Standard measure of balance
F1-W (weighted)	74.2	89.1	Accounts for the importance of failure in the SPP
Precision	75.2	83.1	Basic accuracy metric
Precision-C (cost)	69.5	81.8	Takes into account the penalty for false alarms
Recall (%)	80.1	87.6	Basic completeness metric
Recall-R (risk)	76.0	91.0	Focus on preventing critical failures
Accuracy (%)	78.5	85.3	Overall classification accuracy
WAcc (weighted)	76.4	88.0	Priority on significant errors
DSI	0.932	0.983	Diagnostic stability across scenarios

This indicates that the adapted system is not just more effective "on average", but also delivers higher quality performance in scenarios where failures have the most severe consequences. A similar pattern is observed when comparing Recall and Recall-R. While the absolute increase in Recall is 7.5 p.p., the risk-weighted Recall-R increases by 15 p.p. This suggests that the adapted model is better at predicting those failures that are most dangerous in operational terms - i.e., it contributes not just to classification completeness, but to reducing the likelihood of critical incidents. The metric Precision-C, which accounts for the relative cost of false alarms, shows a particularly significant effect: it increases by 12.3 p.p. (from 69.5% to 81.8%), notably surpassing the growth in classical Precision (7.9 p.p.). This means that the adapted system not

only improves accuracy, but also reduces the number of false diagnostic triggers, which could otherwise lead to unjustified equipment shutdowns or inefficient technical interventions. Values of the Diagnostic Stability Index (DSI) also confirm the advantage of the integrated approach. The increase in DSI from 0.932 to 0.983 indicates that the system maintains stable F1 score performance across various operational scenarios (normal conditions, overload, and data shortage), without losing reliability under non-standard conditions. This is especially important for diagnostic systems (CTS) operating under variable loads, unstable information, and limited resources. An analysis of Accuracy and WAcc values shows that while general accuracy grows by 6.8 p.p., the weighted accuracy - which considers the consequences of errors - increases by 11.6 p.p. This means that qualitative changes occurred not just in the number of correct predictions, but in their significance: improvements occurred where errors would be most costly. Thus, using modified metrics makes it possible to identify effects that remain hidden when evaluating only with classical indicators. This confirms that the proposed diagnostic system not only increases numerical accuracy values, but becomes genuinely more reliable — prioritizing the identification of the most critical situations and minimizing operational risks.

Figure 5 presents a chart comparing the modified metrics between the configurations without adaptation and with adaptation. It demonstrates: a significant improvement in F1-W, Recall-R, and WAcc in the adapted system; a particularly noticeable increase in DSI, reflecting enhanced diagnostic stability; an overall gain not just in accuracy, but in metrics that account for risk, cost, and reliability.

Figure 5 visualizes the quantitative differences between diagnostic system configurations and illustrates the structural redistribution of fault diagnosis quality when transitioning from a non-adaptive architecture to an integrated adaptive one. Notably, the most significant improvements are observed in metrics that account for risks, priorities, and the cost of errors. For instance, the modified recall (Recall-R) in the adapted system reaches 91.0% compared to 76.0% in the baseline, while the weighted F1 score (F1-W) improves from 74.2% to 89.1%. This highlights that the integration of CBR, probabilistic models, and simulation modeling enables the system to handle the most critical failures more effectively—not merely to detect frequent events. The Precision-C metric, which reflects sensitivity to the cost of false alarms,

increased from 69.5% to 81.8%, i.e., by almost 12.3 percentage points, indicating a more “economical” system behavior in operational contexts. In other words, it's not just fewer errors -it's fewer costly errors. This is crucial in marine and energy systems, where a false alarm can lead to unnecessary expenses and disruption of normal operations. Equally telling is the behavior of the DSI: while its increase from 0.932 to 0.983 may seem modest in absolute terms, it signifies that the standard deviation of the F1-score across scenarios has nearly halved. This means the system behaves predictably and reliably under various operational conditions, including overload scenarios and incomplete data. Thus, the figure illustrates a qualitative shift in diagnostics -not just a rise in statistical metrics, but an enhancement of the system's meaningful behavior, particularly under risk, limited information, and high cost of error. The numerical gains across key modified metrics make this effect both compelling and justified. The modified metrics allow the system to: account for the danger of missed failures (Recall-R, F1-W); reflect operational costs of false positives (Precision-C, WAcc); track variability in model behavior under real-world operating conditions (DSI). This is especially important when deploying intelligent diagnostics in critical systems, where the consequences of errors may be highly asymmetric.

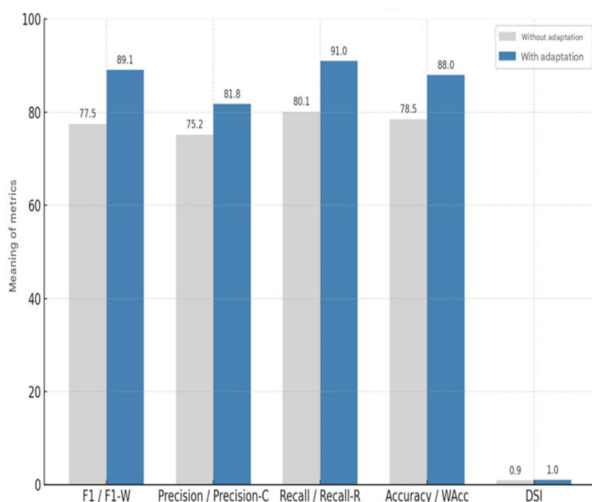


Fig. 5. Comparison of Modified Diagnostic Metrics in the Integrated System With and Without Adaptation

This study presents extensive experimental testing of an integrated approach to diagnosing complex technical systems, combining CBR, probabilistic methods (Bayesian networks and Markov chains), and simulation modeling. A multidimensional evaluation of effectiveness was

conducted using both classical metrics and specially introduced indicators of risk and robustness. Multi-scenario testing under three operating conditions (normal, high load, and data limitation) demonstrated that Accuracy increased from 78.5% to 85.3%, Precision from 75.2% to 83.1%, Recall from 80.1% to 87.6%, and F1 score from 77.5% to 85.3%. Moreover, fivefold cross-validation ( $\sigma F1 = 2.2\%$ ) and a decrease in F1 score of no more than 3 percentage points under artificially limited data confirm the method's high reproducibility and robustness.

A comparative analysis with contemporary studies underscores the uniqueness of our experiment: Soliman [15] is limited to a review of digital twins without CBR or classification metrics; Jovanović [16] combines FTA and BN without simulations or case-based mechanisms; Velasco Gallego et al. [17] assess only RMSE/MAE without considering recall and precision; Schultheis [18] applies a hybrid CBR without probabilistic or simulation components; Daya & Lazakis [19] use DFTA, FMECA, and BBN without multi-scenario testing; Neupane et al. [20] review ML approaches without a hybrid implementation; Lv et al. [21] study FDD models without comprehensive integration or F1 evaluation; and Yan Li et al. [22] are limited to MC simulations without CBR or extended metrics. None of these studies combine all three components or perform a multidimensional effectiveness evaluation, highlighting the completeness and novelty of our validation.

A key outcome is the implementation and validation of modified metrics: weighted Accuracy (WAcc), F1-W (accounting for the degradation importance of nodes), Recall-R (risk-weighted recall), Precision-C (reflecting the cost of false alarms), and the DSI. These metrics revealed that Recall-R reaches 91.0% and DSI 0.983, demonstrating the model's capability to accurately identify critical failures and maintain diagnostic quality under varying operational conditions. This multi-faceted set of complementary indicators enables a comprehensive assessment of operational risks, error costs, and system stability—something unachievable with standard metrics alone. The practical significance lies in the method's readiness for integration into onboard SCADA/PMS of marine power plants and terrestrial power stations, facilitating a transition to intelligent, predictive maintenance, reducing unplanned downtime and costs, and improving operational reliability. Future development prospects, beyond the scope of the current experimental validation, include implementing online monitoring with continuous

real-time adaptation of CBR and probabilistic models, expanding the case base using data from diverse technical assets, and integrating deep neural networks for automatic preprocessing of sensor signals and feature extraction. In summary, the conducted multi-scenario experimental validation and multidimensional performance evaluation confirm the high effectiveness and robustness of the integrated diagnostic approach for complex technical systems, justifying its practical applicability and methodological novelty in the context of intelligent control system assessment.

### Conclusions

The effectiveness of the experimentally validated integrated approach to diagnosing complex technical systems -combining CBR, probabilistic methods (Bayesian networks and Markov chains), and simulation modeling - has been confirmed across three fundamentally different operational modes (nominal, high load, and limited data) and is reproducible based on five-fold cross-validation, with the standard deviation of the F1 score amounting to 2.2%. Accuracy increased from 78.5% to 85.3%, Precision from 75.2% to 83.1%, Recall from 80.1% to 87.6%, and F1 score from 77.5% to 85.3%. Notably, under artificially limited data conditions, the drop in F1 score did not exceed three percentage points, indicating high robustness of the method. The key scientific novelty lies not only in the experimental validation of the synergy between the three methods but also in the development of a system of modified diagnostic metrics tailored to the operational conditions of CTS. In addition to the classical indicators (Accuracy, Precision, Recall, F1 score), the following modified metrics were introduced: weighted Accuracy (WAcc), F1-W (accounting for node degradation importance), Recall R (weighted by failure risk), Precision-C (considering the cost of false alarms), and the DSI, all reflecting operational risks, the economic impact of errors, and system stability under varying conditions. These metrics revealed system properties not captured by standard indicators: Recall-R reached 91.0%, and DSI was 0.983, demonstrating the model's ability to accurately detect critical failures and maintain high reliability under unstable conditions. The practical significance of the approach lies in its potential for integration into onboard monitoring systems of ship power plants and SCADA/PMS systems of land-based power stations, facilitating the shift from scheduled maintenance to intelligent, predictive control of complex technical systems, reducing unplanned downtimes, lowering costs, and increasing overall operational reliability. The

proposed metrics can be used to assess equipment failure risks in CTS and support real-time decision-making, considering not only the presence of faults but also the potential consequences of diagnostic errors in the context of operational criticality. Although this study focuses on experimental verification, future development prospects include implementing continuous real-time adaptation of CBR and probabilistic models, expanding the case base with data from various types of technical systems, and integrating deep learning methods for automatic preprocessing of sensor signals and feature extraction. Thus, the comprehensive experimental verification and the developed system of modified metrics - which enable a formalized assessment of the effectiveness of the integrated diagnostic approach with regard to operational context, robustness, and the impact of errors—confirm its capability to ensure a comprehensive improvement in the quality and reliability of diagnosis and forecasting in complex technical systems. All conclusions are based on the results of a multi-scenario experiment covering three operational modes and are supported by statistically stable cross-validation data, ensuring high reproducibility and confidence in the findings. The experimental validation of the synergy among CBR, probabilistic models, and simulation modeling demonstrates for the first time that their combination provides a significant advantage over using each component individually—representing the key scientific contribution of this work.

### References

1. Vychuzhanin V., Vychuzhanin A. Stochastic Models and Methods for Diagnostics, Assessment, and Prediction of the Technical Condition of Complex Critical Systems / V. Vychuzhanin, A. Vychuzhanin. Kyiv : Liha Pres, 2025. 360 p. <https://doi.org/10.36059/978-966-397-457-6>
2. Vychuzhanin V. V., Rudnichenko N. D. Metody informatsionnykh tekhnologiy v diagnostike sostoyaniya slozhnykh tekhnicheskikh sistem: monografiya / V. V. Vychuzhanin, N. D. Rudnichenko. Odessa : Ekologiya, 2019. 178 p.
3. Yan H., Wang F., Yan G., He D. Hybrid approach integrating case-based reasoning and Bayesian network for operational adjustment in industrial flotation process / H. Yan, F. Wang, G. Yan, D. He // Journal of Process Control. 2021. Vol. 103. Pp. 34–47. <https://doi.org/10.1016/j.procont.2021.05.003>
4. Xu X., Lin Y., Ye C. Fault diagnosis of marine machinery via an intelligent data-driven framework / X. Xu, Y. Lin,

- C. Ye // *Ocean Engineering*. 2023. Vol. 289, No. 1. Article 116302. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.116302>
5. Schweidtmann A. M., Zhang D., von Stosch M. A review and perspective on hybrid modeling methodologies / A. M. Schweidtmann, D. Zhang, M. von Stosch // *Digital Chemical Engineering*. 2024. Vol. 10. Article 100136. <https://doi.org/10.1016/j.dche.2023.100136>
6. Nikpour H., Aamodt A. Fault diagnosis under uncertain situations within a Bayesian knowledge-intensive CBR system / H. Nikpour, A. Aamodt // *Progress in Artificial Intelligence*. 2021. Vol. 10, No. 1. Pp. 245–258. <https://doi.org/10.1007/s13748-020-00227-x>
7. Chen M., Xia J., Huang R., Fang W. Case-based reasoning system for aeroengine fault diagnosis enhanced with attitudinal Choquet integral / M. Chen, J. Xia, R. Huang, W. Fang // *Applied Sciences*. 2022. Vol. 12, No. 11. Article 5696. <https://doi.org/10.3390/app12115696>
8. Soleimani M., Campean F., Neagu D. Integration of Hidden Markov modelling and Bayesian network for fault detection and prediction of complex engineered systems / M. Soleimani, F. Campean, D. Neagu // *Reliability Engineering & System Safety*. 2021. Vol. 215. Article 107808. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2021.107808>
9. El-Awady A., Ponnambalam K. Integration of simulation and Markov chains to support Bayesian networks for probabilistic failure analysis of complex systems / A. El-Awady, K. Ponnambalam // *Reliability Engineering & System Safety*. 2021. Vol. 211. Article 107511. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2021.107511>
10. Zhong D., Xia Z., Zhu Y., Duan J. Overview of predictive maintenance based on digital twin technology / D. Zhong, Z. Xia, Y. Zhu, J. Duan // *Heliyon*. 2023. Vol. 9, No. 4. Article e14534. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e14534>
11. Kalafatelis A. S., Nomikos N., Giannopoulos A., Trakadas P. Survey on predictive maintenance in the maritime industry using machine and federated learning / A. S. Kalafatelis, N. Nomikos, A. Giannopoulos, P. Trakadas // *TechRxiv*. 2025. Vol. 11. <https://doi.org/10.36227/techrxiv.173473250.04784922/v1>
12. Özaydın E., Fıfşkın R., Uğurlu Ö., Wang J. A hybrid model for marine accident analysis based on Bayesian network (BN) and association rule mining (ARM) / E. Özaydın, R. Fıfşkın, Ö. Uğurlu, J. Wang // *Ocean Engineering*. 2022. Vol. 247. Article 110705. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.110705>
13. Cheliotis M., Lazakis I., Cheliotis A. Bayesian and machine learning-based fault detection and diagnostics for marine applications / M. Cheliotis, I. Lazakis, A. Cheliotis // *Ships and Offshore Structures*. 2022. Vol. 17, No. 12. Pp. 2686–2698. <https://doi.org/10.1080/17445302.2021.2012015>
14. OREDA. *Offshore Reliability Data Handbook*. 6th ed. OREDA, 2015.
15. Soliman A., Marsha M. A., Rahaman S. Digital twin predictive maintenance systems / A. Soliman, M. A. Marsha, S. Rahaman // *Journal of Ocean Technology*. 2024. Vol. 19, No. 2. Pp. 46–76.
16. Jovanović I., Karatuğ Ç., Perčić M., et al. Combined fault tree analysis and Bayesian network for reliability assessment of marine internal combustion engine / I. Jovanović, Ç. Karatuğ, M. Perčić, et al. // *Journal of Marine Science and Application*. 2025. <https://doi.org/10.1007/s11804-025-00692-7>
17. Velasco-Gallego C., Lazakis I. Mar-RUL: A remaining useful life prediction approach for fault prognostics of marine machinery / C. Velasco-Gallego, I. Lazakis // *Applied Ocean Research*. 2023. Vol. 140. Article 103735. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2023.103735>
18. Schultheis A. Exploring a hybrid case-based reasoning approach for time series adaptation in predictive maintenance / A. Schultheis // *ICCBR '24 Workshop Proceedings*. CEUR WS, Vol. 3708, 2024.
19. Daya A. A., Lazakis I. Developing an advanced reliability analysis framework for marine systems operations and maintenance / A. A. Daya, I. Lazakis // *Ocean Engineering*. 2023. Vol. 272. Article 113766. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.113766>
20. Neupane D., Bouadjenek M. R., Dazeley R., Aryal S. Data-driven machinery fault diagnosis: A comprehensive review / D. Neupane, M. R. Bouadjenek, R. Dazeley, S. Aryal // *Neurocomputing*. 2025. Vol. 627. Article 129588. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2025.129588>
21. Lv Y., Yang X., Li Y., Liu J., Li S. Fault detection and diagnosis of marine diesel engines: A systematic review / Y. Lv, X. Yang, Y. Li, J. Liu, S. Li // *Ocean Engineering*. 2024. Vol. 294. Article 116798. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.116798>
22. Li Y., Zhang W., Cui L., Gao H. System reliability modeling and analysis for a marine power equipment operating in a discrete-time dynamic environment / Y. Li, W. Zhang, L. Cui, H. Gao // *Quality and Reliability Engineering International*. 2024. Vol. 40. Pp. 3422–3438. <https://doi.org/10.1002/qre.3577>

**Вичужанін В. В., Вичужанін О. В.**  
**Інтегрований підхід до діагностики складних технічних систем: експериментальна валідація та багатовимірні оцінки ефективності**

У цій статті представлено всебічну експериментальну верифікацію інтегрованого підходу до діагностики технічного стану (ТС) складних технічних систем (СТС) на прикладі суднових енергетичних установок (СЕУ). Запропонована методологія поєднує логіку прецедентів (Case Based Reasoning – CBR), ймовірнісне прогнозування за допомогою байєсівських мереж і марковських ланцюгів, а також імітаційне моделювання сценаріїв деградації та каскадних відмов. Тестування проводилось за трьома сценаріями: нормальний режим експлуатації, режим підвищеного навантаження та сценарій з обмеженою доступністю даних, що дозволило всебічно оцінити адаптивність алгоритмів і їх стійкість до змінних експлуатаційних факторів. Для кількісної оцінки якості діагностики використовувались класичні метрики бінарної класифікації (Accuracy, Precision, Recall і F1 score), а також нововведені розширені показники: зважена точність (WAcc), F1-оцінка з урахуванням критичності відмов компонентів (FIW), повнота зі зважуванням на ризик відмови (RecallR), скоригована точність з урахуванням вартості помилкових тривог (PrecisionC) та Індекс стабільності діагностики (DSI). Результати багатосценарного експерименту показали стабільне покращення всіх основних показників: Accuracy зросла з 78.5% до 85.3%, Precision – з 75.2% до 83.1%, Recall – з 80.1% до 87.6%, F1 score – з 77.5% до 85.3%, RecallR досягла 91.0%, а DSI становив 0.983. П'ятикратна крос-валідація показала стандартне відхилення F1 score

на рівні 2.2%, що підтверджує відтворюваність і надійність запропонованого методу для експериментального тестування інтегрованого підходу до діагностики СТС. Реалізація циклічної процедури "імітація – ймовірності – адаптація CBR" значно зменшила кількість помилкових тривог та пропущених критичних відмов обладнання СЕУ. Практична значущість підходу полягає у можливості його інтеграції в SCADA/PMS-системи морських СТС та наземних енергетичних станцій, що сприятиме переходу до інтелектуального прогнозного обслуговування, зменшенню незапланованих простоїв, зниженню витрат і підвищенню надійності обладнання. Перспективи майбутніх досліджень включають підвищення адаптивності підходу, розширення бази прецедентів та розробку інструментів для автоматизованої обробки гетерогенних даних.

**Ключові слова:** прогнозна діагностика, байєсівські мережі, адаптація CBR, моделювання відмов, ризик-орієнтовані метрики, стабільність діагностики, інтелектуальне обслуговування

**Вичужанін Володимир Вікторович** – д.т.н, професор, завідувач кафедри інформаційних технологій, національний університет «Одеська політехніка», Одеса, email: [v.v.vychuzhanin@op.edu.ua](mailto:v.v.vychuzhanin@op.edu.ua)

**Вичужанін Олексій Володимирович** – доктор філософії, асистент, національний університет «Одеська політехніка», Одеса, email: [v.v.vychuzhanin@op.edu.ua](mailto:v.v.vychuzhanin@op.edu.ua)

Стаття подана 12.05.2025.

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-291-5-18-28>

УДК 004.03:004.67

## КОНЦЕПТУАЛЬНА МОДЕЛЬ ІНФОРМАЦІЙНОЇ БЕЗПЕКИ НАВЧАЛЬНИХ КОМП'ЮТЕРНИХ ЛАБОРАТОРІЙ

Могильний Г.А., Донченко В.Ю., Швець І.М., Донченко С.М., Кузнецов В.С.

## CONCEPTUAL MODEL OF INFORMATION SECURITY OF EDUCATIONAL COMPUTER LABORATORIES

Mohylnyi H.A., Donchenko V.U., Shvets I.M., Donchenko S.M., Kuznetsov V.S.

*В умовах військового стану та швидкого розвитку ІКТ ефективна протидія кібератакам як елементу гібридної війни потребує спільних зусиль державних установ, об'єктів критичної інфраструктури, промислових підприємств та навчальних закладів. За таких обставин важливим стає перегляд основ інформаційної безпеки. Стаття присвячено дослідженню та класифікації моделей інформаційної безпеки, що застосовуються для побудови ефективних систем захисту інформації. У роботі розглядаються три основні типи моделей: концептуальна модель, математична модель та функціональна модель*

*Концептуальна модель – слугує базисом для формування загальних процесів створення системи безпеки, визначає ключові напрямки та структуру захисту інформації.*

*Окрім аналізу моделей, робота висвітлює особливості впровадження систем захисту інформації в навчальних установах. Серед основних проблем встановлено: відсутність спеціалізованих відділів та відповідальних осіб за інформаційну безпеку; недостатній рівень підготовки навчально-допоміжного персоналу; велика різниця у кваліфікації користувачів; складність забезпечення безпеки при відкритості навчального процесу та зростаючих вимогах до впровадження дистанційних освітніх технологій.*

*Особливості побудови системи безпеки в навчальних закладах є необхідність пошуку компромісного рішення між відкритістю навчального процесу та студентоцентрованим навчанням; забезпеченням комфортних умов доступу до всіх матеріалів навчального процесу та жорсткими положеннями до витоку конфіденційної та службової інформації. В роботі пропонується один із варіантів розробки концептуальної моделі безпеки як основи для подальшого впровадження ефективних заходів*

*захисту, враховуючи специфіку роботи навчальних закладів та їх інформаційного середовища. Створення цієї моделі є важливим першим кроком для побудови системи безпеки. На основі проведеного аналізу пропонується переглянути основні підходи до захищеності інформації в навчальних закладах, особливо з урахуванням специфіки дистанційного навчання та відкритості освітніх процесів.*

**Ключові слова:** навчальна комп'ютерна лабораторія, заклад освіти, кібербезпека, загрози, модель, система захисту.

**Вступ.** У сучасних умовах стрімкого розвитку інформаційно-комунікаційних технологій та систем віддаленого використання інформаційних ресурсів, ефективна протидія кібератакам, що стала важливою складовою гібридної війни, вимагає консолідації та об'єднання зусиль державних органів, об'єктів критичної інфраструктури та організацій з підготовки та перепідготовки фахівців, які активно застосовують корпоративні системи та засоби віддаленого доступу до інформації. В таких обставинах перегляд ключових принципів інформаційної безпеки набуває особливої ваги в діяльності підприємств та навчальних закладів. Важливим питанням побудови системи безпеки є розгляд та створення різних моделей інформаційної безпеки, які можуть застосовуватися під час побудови системи інформаційної безпеки.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Аналіз наукових джерел з питань кібербезпеки закладів вищої освіти засвідчує, що

дослідження ведуться у таких проблемних напрямках:

– проблеми забезпечення кібербезпеки в закладах вищої освіти (Ю. С. Антонов, П. В. Римар та О. Г. Антонова [2]; О. О. Ільїн, С. О. Серих та В. В. Вишнівський [6]; В. Ю. Кива [7]; Н. М. Кириленко [8]; О. Ю. Чубукова та І. В. Пономаренко [17]; A. Ghazvini, Z. Shukur та Z. Hood [31]; S. Hina та P. D. Dominic [32]; C. Joshi та U. K. Singh [35]);

– теоретичне обґрунтування системи управління кібербезпекою ЗВО (О. О. Ільїн [5]; А. Ю. Нашинець-Наумова, В. Л. Бурячок, Н. В. Коршун, О. Б. Жильцов, П. М. Складанний та Л. В. Кузьменко [16]; I. S. Bianchi та R. D. Sousa [25]; Y. Zeng, H. Zhang, X. Liu, Y. Fu, Q. Deng та R. Ye [34]);

– оцінювання кібербезпеки ЗВО (М. Н. Suwito, S. Matsumoto, J. Kawamoto, D. Gollmann та K. Sakurai [24]; W. Yustanti, A. Qoiriah, R. Bisma та A. Prihanto [23]; Н. П. Кухарська [10]);

– проблеми кібербезпеки учасників освітньо-наукової діяльності ЗВО (В. Ю. Биков, О. Ю. Буров та Н. П. Дементієвська [3]; M. Gratian, S. Bandi, M. Cukier, J. Dykstra та A. Ginther [27]; Z. Yan, T. Robertson, R. Yan, S. Y. Park, S. Bordoff, Q. Chen та E. Sprissler [30]; W. D. Kearney та H. A. Kruger [36]; G. Ogutcu, O. M. Testik та O. Chouseinoglou [39]; M. Rajab [40]);

– проблеми побудови моделей інформаційної безпеки ресурсів загалом та в закладах вищої освіти (О. Є. Ананченко [1]; А. Ю. Нашинець-Наумова, В. Л. Бурячок, Н. В. Коршун, О. Б. Жильцов, П. М. Складанний, Л. В. Кузьменко [4]; Ю. В. Кожедуб, С. В. Василенко, А. В. Максимець, В. А. Гирда [9]; О. Г. Трапезон, Т. Ф. Гумен, К. О. Трапезон, В. А. Граб, Н. С. Золотарева [14]; Я. І. Шестак, В. І. Чубаєвський [18]; О. К. Юдін, С. С. Бучик [19-20]; А. І. Ясінська [21]; J. Chang, Y. Jeon, S. Sim [26]; C. K. Wong, S. B. Maynard, A. Ahmad, and H. Naseer [33]; Y. Lee [37]).

В роботах [11-13] розглядаються особливості роботи навчальних комп'ютерних лабораторій та створення корпоративного середовища у навчальних закладах, однак практично не розглядаються питання безпеки створеного інформаційного середовища.

У результаті аналізу [22, 28, 29, 38] сучасних підходів до управління кібербезпекою та розробки інтелектуальних систем підтримки рішень встановлено, що ефективного забезпечення інформаційної безпеки в умовах зростаючих

кіберзагроз потребує комплексного, адаптивного та інтелектуалізованого підходу. Морфологічні моделі дозволяють формувати раціональні стратегії захисту, враховуючи множину можливих варіантів реалізації. Особливу увагу приділено розвитку самоосвітніх систем виявлення аномалій, які здатні адаптуватися до змін у поведінці зловмисників, зокрема до варіацій інтенсивності, швидкості та тривалості атак. У свою чергу, інтелектуальні системи підтримки рішень, орієнтовані на фінансове планування та інвестування в цифрову трансформацію кібербезпеки, сприяють прийняттю обґрунтованих управлінських рішень з урахуванням специфіки предметної області. Окрему цінність становлять методи багатокритеріальної оптимізації витрат на інформаційну безпеку, зокрема з використанням генетичних алгоритмів. Таким чином, поєднання інтелектуальних технологій, адаптивних моделей та оптимізаційних підходів створює підґрунтя для побудови ефективних, гнучких і стійких систем кіберзахисту.

Існує кілька моделей, кожна з яких дозволяє відповісти на поставлені перед нею питання. Можна виділити три основні моделі інформаційної безпеки, це:

- концептуальна модель,
- математична модель,
- функціональна модель.

Концептуальна модель дозволяє сформулювати найбільш загальні процеси створення системи безпеки вона створюється на першому етапі моделювання. Ця модель інформаційної безпеки відповідає на загальні питання і схематично відбиває загальну структуру моделі інформаційної безпеки, на ній як на стрижні будуються інші моделі і концепції інформаційної безпеки.

Мета даної роботи – на засадах комплексного аналізу системи інформаційної безпеки у навчальних закладах виявити особливості її впровадження та розробити загальні основні складові концептуальної моделі безпеки, що дозволяє запровадити першочергові заходи спрямовані на підвищення інформаційної безпеки.

Математична модель – це формалізований опис сценаріїв у вигляді логічних алгоритмів представлених послідовністю дій порушників і заходів у відповідь. Розрахункові кількісні значення параметрів моделі характеризують функціональні залежності, що описують процеси взаємодії порушників із системою

захисту та можливі результати дій. Саме такий вид моделі найчастіше використовується для кількісних оцінок уразливості об'єкта, побудови алгоритму захисту оцінки ризиків та ефективності вжитих заходів.

При побудові даних моделей необхідно спиратися на такі найважливіші обставини:

- вибір критеріїв для оцінки важливості (пріоритетності) інформаційних ресурсів;
- створення кількісних показників різноманітних видів вразливостей об'єктів;
- вибір критеріїв оцінки запропонованих напрямків, методів та засобів захисту;
- створення кількісних показників різноманітних підсистем захисту;
- вибір критеріїв оптимальності системи захисту інформації для даної архітектури інформаційної системи;
- чітке математичне формулювання завдання побудови моделі засобів захисту інформації, що враховує задані вимоги до системи захисту та дозволяє побудувати засоби захисту інформації відповідно до цих критеріїв.

Безумовно з математичною моделлю напряму пов'язана функціональна модель.

У подальшому, в межах функціональної моделі, розробляються і досліджуються алгоритми щодо практичного застосування і доказовості наведених припущень. Ця модель визначає потоки інформації, дозволені в системі, та правила керування доступом до інформації.

Існує декілька основних типів функціональних моделей:

1. Модель дискреційного доступу (DAC) – контролюється доступ суб'єктів (користувачів або додатків) до об'єктів, що становлять різні інформаційні ресурси: файли, додатки, пристрої виведення тощо. Класичний варіант – закрита система, тобто спочатку об'єкт не доступний нікому, і в списку прав доступу описується набір дозволів.

2. Модель безпеки Белла-ЛаПадули – є одна з найвідоміших моделей безпеки (модель мандатного управління доступом). У ній визначено безліч понять, пов'язаних із контролем доступу. Даються визначення суб'єкта, об'єкта та операції доступу, а також математичний апарат для їх опису.

3. Рольова модель контролю доступу (RBAC) – контролює доступ користувачів до інформації на основі типів їх дій у системі. Під

роллю розуміється сукупність дій та обов'язків, пов'язаних із певним видом діяльності. При цьому з кожним об'єктом зіставлено набір дозволених операцій доступу кожної ролі, а не певного користувача. Кожному користувачеві зіставлені ролі (у деяких – декілька ролей), які може виконувати.

4. Системи розмежування доступу (СРД) – це сукупність реалізованих правил розмежування доступу у засобах обчислювальної техніки чи автоматизованих системах, більшість з яких базуються на концепції диспетчера доступу – абстрактної машини (захищений, відокремлений процес), яка виступає посередником при всіх зверненнях суб'єктів до об'єктів. Диспетчер доступу використовує базу даних захисту, в якій зберігаються правила розмежування доступу і на підставі цієї інформації дозволяє або не дозволяє суб'єкту доступ до об'єкта, а також фіксує інформацію про спробу доступу в окремому журналі. Ця база будується з урахуванням матриці доступу чи однієї з її перетворень. Таким чином матриця доступу – це таблиця, в якій рядки відповідають суб'єктам, стовпці – об'єктам доступу, а на перетині рядка та стовпця містяться правила (дозвіл) доступу суб'єкта до об'єкта.]

Основними недоліками такої матриці є надмірно велика розмірність і складність адміністрування і для подолання цих складнощів матриця доступу в СРД часто замінюється деякими її перетвореннями:

- Списки керування доступом (access control lists, ACL). Для кожного об'єкта задано список суб'єктів, які мають ненульові повноваження доступу до них (із зазначенням цих повноважень).

- Списки повноважень суб'єктів. Аналогічно ACL, але для кожного суб'єкта заданий список об'єктів, доступ яких дозволено із зазначенням повноважень доступу. Таке уявлення називається профілем суб'єкта.

- Атрибутні схеми. Засновані на присвоєнні суб'єктам та/або об'єктам певних міток, що містять значення атрибутів. Елементи матриці доступу не зберігаються у явному вигляді, а динамічно обчислюються при кожній спробі доступу конкретної пари суб'єкт-об'єкт на основі їх атрибутів.

Першим важливим кроком перед створенням та запровадженням певної магматичної та функціональної моделі є проведення загального аналізу системи безпеки та створення концептуальної моделі. Основним

особливостям створення цієї моделі для навчальних установ і присвячена дана робота.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Важливим питанням у створенні інформаційної систем навчального закладу є аналіз системи безпеки та створення різних моделей інформаційної безпеки, які можуть застосовуватися під час розробки та впровадження різноманітних програмно-технічних та організаційних заходів щодо забезпечення збереження інформації. Безумовно питання стабільності роботи обладнання, організації захищеного середовища даних та програмних розробок мають цілу низьку особливостей у навчальних підрозділах та навчальних комп'ютерних лабораторіях (НКЛ). Ці питання межують між вимогами:

- відкритість навчального процесу та студентоцентроване навчання;
- забезпечити комфортні умови доступу до всіх матеріалів навчального процесу
- жорсткими положеннями до витоку конфіденційної та службової інформації.

Попередній аналіз діяльності навчальних установ свідчить, що важною особливістю впровадження системи захисту є відсутність окремих відділів по захисту інформації.

В більшості випадків завдання по забезпеченню кібербезпеки покладено навчально допоміжний персонал. Крім того, слід враховувати дуже складну ситуацію у закладах середньої освіти де всіма питаннями по налаштуванню роботи обчислювальної техніки, забезпеченню захисту інформації та організацію інформаційного освітнього середовища у більшості випадків покладено на викладачів інформатики. У системі вищої школи та закладах середньої освіти не передбачено окремі посади, які відповідають за питання кіберзлочинності.

Значною особливістю вишів є велика різниця та великий розкид у кваліфікації викладачів та студентів різноманітних спеціальностей. Навчальний процес більшості спеціальностей та освітніх програм містить освітні компоненти спрямовані на використання обчислювальної техніки та програмного забезпечення якоїсь певної (дуже різноманітної) галузі знань. Обладнання у НКЛ використовують студенти різноманітним спеціальностей як з великим обсягом комп'ютерних дисциплін, так спеціальностей у яких знання засобів обчислювальної техніки та

методів програмування не включено до основних професійних компетентностей.

В результаті такого становища, процеси створення моделей захисту, впровадження певних заходів по їх удосконаленню, аналізу спроб несанкціонованого використання інформаційних ресурсів практично не виконуються або підтримуються на дуже слабкому рівні.

Таким чином, особливостями впровадження системи захисту інформації у навчальних установах та окремих НКЛ є:

- Відсутність відділів та осіб відповідальних за систему інформаційної безпеки;
  - Недостатній рівень підготовки навчально-допоміжного персоналу в напрямку інформаційної безпеки;
  - Значна різниця у кваліфікації користувачів: здобувачів освіти та викладачів;
  - Відсутність системи моніторингу питань інформаційної безпеки;
  - Недостатнє фінансування;
  - Необхідність підтримки дистанційної освіти та організації віддаленого доступу до інформації;
  - Швидкий перехід на інформаційно-комунікаційні технології;
  - Необхідність підтримки «відкритості» навчального процесу, всіх його складових та впровадження нових засобів розповсюдження інформації;
  - Необхідність створення умов для використання різноманітних обчислювальних пристроїв (особистих комп'ютерів, мобільних пристроїв, планшетів та інше) викладачів та здобувачів освіти;
  - Використання спеціалізованого програмного забезпечення для налаштування, моніторингу, обслуговування різноманітних обчислювальних приладів у навчальному процесі;
  - Відсутність необхідного матеріально-технічного забезпечення в умовах швидкого впровадження рішень спрямованих на впровадження дистанційної освіти.
- Для побудови концептуальної моделі інформаційної безпеки незалежно від того, наскільки проста чи складна інформаційна система, необхідно як мінімум відповісти на три питання:
- що захищати;
  - від кого захищати;
  - як захищати.



Рис. 1. Загальна концептуальна модель інформаційної безпеки

Це обов'язковий мінімум, якого може бути достатньо для невеликих інформаційних систем. Однак, беручи до уваги можливі наслідки, то краще виконати побудову повної концептуальної моделі інформаційної безпеки, в якій необхідно визначити (Рис. 1):

- джерела інформації,
- пріоритет чи ступінь важливості інформації,
- джерела загроз,
- цілі загроз,
- загрози,
- способи доступу,
- напрями захисту,
- засоби захисту,
- методи захисту.

При побудові моделі слід враховувати особливості діяльності навчального закладу або окремого структурного підрозділу. В межах цієї роботи розглянемо концептуальну модель за умови, що інші структурні підрозділи навчального закладу знаходяться у відокремленому, окремому та захищеному інформаційному середовищі. Тому до моделі включено тільки інформацію, яка може бути розташована або використана у НКЛ.

З врахуванням особливостей діяльності НКЛ та особливостей сучасного стану системи захисту інформації у навчальних закладах при побудові концептуальної моделі системи захисту інформації необхідно врахувати та планувати наступні дії:

1. Провести попередній моніторинг існуючої (або відсутньої) системи захисту інформації. За необхідністю, створити тимчасову комісію з питань інформаційної безпеки.

2. Призначити відповідальних осіб за систему захисту інформації.

3. Провести попередній аналіз доцільності впровадження системи з віддаленим доступом до НКЛ в умовах наявності/відсутності системи захисту інформації.

4. Відокремити першочергові заходи.

5. Провести попередній аналіз необхідних коштів для впровадження систем з віддаленим доступом та забезпечення певних мінімальних вимог до захисту інформації.

Безумовна концептуальна модель інформаційної безпеки НКЛ (рис.2) включає основні положення загальної моделі. В процесі її розробки необхідно проаналізувати та провести уточнення основних положень.

Джерела інформації НКЛ це:

- Навчально-методичні матеріали, які використовуються у навчальному процесі. Особливу увагу необхідно надати їх цілісності та створити умови для цілодобового використання. Слід зауважити, що матеріали комп'ютерних дисциплін можуть мати спеціальну навчально-технічну інформацію.

- Кабельна мережа, мережа Wi-Fi, її структура та адресування, імена користувачів та паролі. Дуже велике значення можуть мати «відкриті» імена користувачів та паролі, які використовуються у навчальних цілях.

- Співробітники, викладачі та студенти, які мають можливість випадково (або навмисно) повідомляти о наявних інформаційних ресурсах та шляхах їх використання.

- Серверні, локальні та особисті накопичувачі. Слід враховувати, що особисті накопичувачі слабо контролюються та можуть бути джерелами вірусів або використовуватись для несанкціонованого доступу до інформації.

- Спеціалізоване програмне забезпечення, яке використовується у навчальному процесі. Особливу увагу слід приділити ПЗ, яке орієнтовано на налаштування, моніторинг та обслуговування обчислювальної техніки і використовується у навчальному процесі комп'ютерних спеціальностей.

- Мобільні пристрої та ноутбуки викладачів та студентів – це пристрої які можуть бути використані для створення різноманітних атак на інформаційну систему.

- Особисті документи викладачів, які зберігаються на інформаційних ресурсах

Пріоритетність інформації НКЛ має значні особливості в залежності від спрямованості самої НКЛ та її структури. Попередній аналіз показав необхідність врахування інформації яка може створити умови для порушення системи безпеки, наприклад:

- Структура та адресування мережі, розташування серверних машин та мережевих приладів – це одна з найважливіших складових, використання якої може надати зловмиснику вагомі переваги у створенні загрози. Слід врахувати, що більшість НКЛ розповсюджує цю інформації в процесі виконання певних лабораторних робіт.

- Пріоритетні користувачі, їх імена, паролі та права доступу.

- Навчально-методичні матеріали можуть бути використані з метою особистої вигоди, впливу на оцінювання.

- Спеціалізоване програмне забезпечення може бути використано для організації атаки. Особливу загрози створюють спеціалізовані програми спрямовані на вивчення та моніторинг комп'ютерного та мережевого обладнання.

- Загальне програмне забезпечення може бути непрацездатним та перешкодити проведенню навчальних занять.

- Особисті документи викладачів – ця інформація найменшого пріоритету для НКЛ.

Джерела загроз у НКЛ мають незначні особливості

- Інтернет – загроза, вплив якої значно зростає зі створенням системи віддаленого доступу і дає вплив на НКЛ постійно. Крім того, ця загроза надає можливість впливати на діяльність НКЛ багатьом користувачам, які підключені до Інтернет.

- Внутрішня мережа, яка в багатьох випадках «відкрита» для використання викладачами, гостями та здобувачами освіти та

створює умови для проведення різноманітних кібератак .

- Прилади студентів та викладачів, які використовуються в межах «відкритого навчального середовища»

- Спеціалізовані прилади та ПЗ навчального процесу, яке може бути використано для несанкціонованого доступу.

- Інші відвідувачі, які відвідують навчальний заклад.

Цілі загроз у НКЛ в цілому співпадають з багатьма іншими підрозділами: ознайомлення, дублювання, модифікація, знищення, порушення працездатності. Слід відзначити, що треба додатково врахувати специфічні для НКЛ: цікавість, випадковість, порушення авторського права, використання в особистих цілях.

Загрози у НКЛ не відрізняються від інших установ та складаються з: доступність інформації, непрацездатність приладів та ПЗ, цілісність ПЗ та інформації, конфіденційність

До засобів доступу у НКЛ відносяться: розголошення, витік, особисті прилади, несанкціонований доступ.

Напрями захисту це: програмно – апаратний, організаційний, інженерно-технічний. Однак практично не можливо використати правовий (юридичний) напрям захисту, тому що більшість учасників освітнього процесу не пов'язано трудовими відносинами.

До методів захисту слід віднести: попередження, роз'яснення, запобігання. Більш слабкі методи у НКЛ: аналіз та вивчення випадків, припинення, протидія тому що вони потребують створення спеціалізованого підрозділу з безпеки інформації.

Таким чином, концептуальну модель інформаційної безпеки можна представити у вигляді схеми, що зображена на рис. 2.

**Висновки.** В результаті проведеного дослідження літературних джерел наведено огляд та класифікацію різноманітних моделей, які використовуються в процесах створення системи інформаційної безпеки. Встановлено, що першим важливим кроком є створення концептуальної моделі безпеки інформації.

Аналіз системи інформаційної безпеки у НКЛ показав, що більшості навчальних закладів необхідно більше уваги приділити процесам підвищення захищеності інформації. Важливу складову додає необхідність швидкого впровадження дистанційних методів навчання. Встановлено та наведено особливості процесу впровадження цієї системи. До основних, з яких, відносяться: відкритість навчального процесу



Рис. 2. Концептуальна модель безпеки НКЛ

- та необхідність забезпечення доступу до всіх матеріалів навчального процесу;
- відсутність відділів та осіб відповідальних за систему інформаційної безпеки;
- значна різниця у кваліфікації користувачів: здобувачів освіти та викладачів;
- недостатнє фінансування;
- використання спеціалізованого програмно-технічного забезпечення у навчальному процесі та дозвіл на використання особистої техніки учасників навчального процесу.

З урахуванням цих особливостей розроблено концептуальну модель безпеки, на засадах якої можна розробити першочергові заходи спрямовані на підвищення інформаційної безпеки у навчальних закладах.

### Література

1. Ананченко О. Розробка корпоративної освітньої інформаційної системи за допомогою методів машинного навчання та методик забезпечення інформаційної безпеки. Електронне фахове наукове видання «Кібербезпека: освіта, наука, техніка». 2023. № 2(22). С. 264–273. URL: <https://doi.org/10.28925/2663-4023.2023.22.264273>
2. Антонов Ю., Римар П., Антонова О. Проблема DoS/DDoS атак навчальних ресурсів студентами. Сучасний захист інформації. 2019. № 4(40). С. 52–62.
3. Биков В., Бузов О., Дементієвська Н. Кібербезпека в цифровому навчальному середовищі. Інформаційні технології і засоби навчання. 2019. № 2(70). С. 313–331.
4. Дослідження розвитку та інновації кіберзахисту на об'єктах критичної інфраструктури / Я. Машталяр та ін. Кібербезпека: освіта, наука, техніка. 2023. № 2. С. 156–167. URL: <https://doi.org/10.28925/2663-4023.2023.22.156167>.
5. Ільїн О. О. Когнітивна модель управління інформаційною безпекою вищого навчального закладу. Сучасний захист інформації: науково технічний журнал. 2017. № 2(30). С. 24–30.
6. Ільїн О., Серих С., Вишнівський В. Аналіз уразливості інформаційного ресурсу вищого навчального закладу та класифікація загроз інформаційної безпеки. Сучасний захист інформації. 2017. № 1. С. 66–72.
7. Кива В. Аналіз чинників, які впливають на кібербезпеку вищого військового навчального закладу. Кібербезпека: освіта, наука, техніка. 2022. № 3(15). С. 53–70. URL: <https://doi.org/10.28925/2663-4023.2022.15.5370>.
8. Кириленко Н. Проблеми інформаційної безпеки освітнього середовища вищого навчального закладу. Інформаційно-телекомунікаційні технології в сучасній освіті: досвід, проблеми, перспективи : Третя міжнар. наук.- практ. конф. : у 2 ч.. Львів, 2012. С. 149–151.
9. Концептуальна модель захисту інформації об'єктів критичної інформаційної інфраструктури України / Ю. Кожедуб та ін. Information Technology and Security. 2021. Т. 9, № 2(17). С. 151–164.
10. Кухарська Н. П. Оцінка інформаційного середовища вищих навчальних закладів та аналіз загроз його безпеці. Інформаційнокомунікаційні технології в сучасній освіті: досвід, проблеми, перспективи. 2015. Вип. 4. Ч. 2. С. 31–35.
11. Могильний Г. Аналіз програмно-апаратних засобів створення системи з віддаленим доступом до навчальних комп'ютерних лабораторій закладів середньої освіти. Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. 2023. № 1(277). С. 5–19.

- URL: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2019-256-8-5-19>
12. Могильний Г., Донченко В., Донченко С. Огляд та аналіз інструментів створення корпоративного середовища. Інформаційні технології та суспільство. 2024. № 4 (15). С. 99–107. URL: <https://doi.org/10.32689/maup.it.2024.4.16>
  13. Могильний Г., Семенов М., Кіреєв І. Впровадження системи віддаленого доступу до інформаційних ресурсів комп'ютерних лабораторій. Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. 2022. № 2 (272). С. 7–14. URL: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2022-272-2-7-14>.
  14. Моделі безпеки в інформаційних системах / О. Трапезон та ін. Київ: WORLD SCIENCE. Page 2. ISSN 2413-1032. № 12(16), Vol.1, December 2016.
  15. Моделювання мінімальної кількості вузлів кластера віртуалізації приватних університетської хмари / В. Лахно та ін. Електронне фахове наукове видання «Кібербезпека: освіта, наука, техніка». 2023. № 1(21). С. 177–192. URL: <https://doi.org/10.28925/2663-4023.2023.21.177192>.
  16. Технологія забезпечення інформаційної і кібербезпеки в закладах вищої освіти України / А. Ю. Нашинець-Наумова та ін. Information Technologies and Learning Tools. 2020. № 3(77). С. 337–354. URL: <https://doi.org/10.33407/itlt.v77i3.3424>
  17. Чубукова О., Пономаренко І. Інформаційна безпека у навчальних закладах України. Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. 2018. Спец. випуск. С. 388–395.
  18. Шестак Я., Чубаєвський В. Моделювання інформаційної інфраструктури ЗВО. Електронне фахове наукове видання «Кібербезпека: освіта, наука, техніка». 2023. № 1(21). С. 121–135. URL: <https://doi.org/10.28925/2663-4023.2023.21.121135>
  19. Юдін О. К., Бучик С. С. Державні інформаційні ресурси. Методологія побудови класифікатора загроз. – 2015.
  20. Юдін О., Бучик С. Концептуальна модель інформаційної безпеки державних інформаційних ресурсів. Наукоємні технології. 2014. вип. 4. С. 462–466. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nt\\_2014\\_4\\_15](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nt_2014_4_15).
  21. Ясінська А. Інформаційна безпека підприємства: концептуальні засади ефективного захисту інформації. Економіка та суспільство. 2023. № 56. URL: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2023-56-118>
  22. A model developed for teaching an adaptive system of recognising cyberattacks among non-uniform queries in information systems / V Lakhno et al. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2016. № 4(9(82)). P.27–36. URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.73315>
  23. An analysis of Indonesia's information security index: a case study in a public university. / W. Yustanti et al. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. T.296. URL: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/296/1/012038>.
  24. An Analysis of IT Assessment Security Maturity in Higher Education Institution / M. Suwito et al. Information Science and Applications. 2016. P. 701–713.
  25. Bianchi I., Sousa R. IT Governance Mechanisms in Higher Education. Procedia Computer Science. 2016. № 100. P. 941–946. URL: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2016.09.253>.
  26. Chang J., Jeon Y., Sim S. Information Security Modeling for the Operation of a Novel Highly Trusted Network in a Virtualization Environment. International Journal of Distributed Sensor Networks. 2021. URL: <https://doi.org/10.1155/2015/359170>.
  27. Correlating human traits and cyber security behavior intentions. / M. Gratian et al. Computers & Security. 2018. №73. P.345–358. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cose.2017.11.015>.
  28. Decision Support Model for Assessing Projects by a Group of Investors with Regards of Multi-factors / V Lakhno et al. In: Silhavy, R. (eds) Artificial Intelligence and Bioinspired Computational Methods. CSOC. Advances in Intelligent Systems and Computing, 2020. vol 1225. Springer, Cham. URL: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-51971-1\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-030-51971-1_1)
  29. Development of a support system for managing the cyber protection of an information object / V Lakhno et al. Journal of Theoretical and Applied Information Technology. 2017. № 95(6). P. 1263–1272
  30. Finding the weakest links in the weakest link: How well do undergraduate students make cybersecurity judgment? / Z. Yan et al. Computers in Human Behavior. 2018. № 84. P. 375–382. URL: <https://doi.org/10.1016/j.chb.2018.02.019>
  31. Ghazvini A., Shukur Z., Hood Z. Review of Information Security Policy based on Content Coverage and Online Presentation in Higher Education. International Journal of Advanced Computer Science and Applications. 2018. №9(8). P. 410–423. URL: <https://doi.org/10.14569/ijacsa.2018.090853>.
  32. Hina S., Dominic P. Information security policies' compliance: A perspective for higher education institutions. Journal of Computer Information Systems. 2020. № 60(3). P. 201–211.

33. Information Security Governance: A Process Model and Pilot Case Study / C. Wong та ін. ICIS 2020. ISSN 978-1-7336325-5-3. URL: <https://aisel.aisnet.org/icis2020>.
  34. Information system and management for campus safety. У SIGSPATIAL '19: 27th ACM SIGSPATIAL / Y. Zeng et al. International Conference on Advances in Geographic Information Systems. ACM. 2019. URL: <https://doi.org/10.1145/3356998.3365760>.
  35. Joshi C., Singh U. Information security risks management framework – A step towards mitigating security risks in university network. Journal of Information Security and Applications. 2017. №35. P. 128–137.
  36. Kearney W., Kruger H. Can perceptual differences account for enigmatic information security behaviour in an organisation? Computers & Security. 2016. № 61. P. 46–58.
  37. Lee Y. Information Security Investment Model and Level in Incomplete Information. Journal of the Korea Institute of Information Security & Cryptology. 2017. T. 27, is.4. P. 855–861. URL: <https://doi.org/10.13089/JKIISC.2017.27.4.855>
  38. Multi-criterial optimization composition of cyber security circuits based on genetic algorithm / V Lakhno et al. Journal of Theoretical and Applied Information Technology 15th April 2022. Vol. 100. № 07. P. 1996–2006. URL: <http://www.jatit.org/volumes/Vol100No7/3Vol100No7.pdf>
  39. Ogutcu G., Testik O., Chouseinoglou O. Analysis of personal information security behavior and awareness. Computers & Security. 2016. № 56. P. 83–93.
  40. Rajab M. The relevance of social and behavioral models in determining intention to comply with information security policy in higher education environments. Eastern Michigan University. Computers & Security. 2019. T.80. P. 211-223.
- References**
1. Ananchenko O. Rozrobka korporatyvnoi osvithoi informatsiinoi systemy za dopomohoiu metodiv mashynnoho navchannia ta metodyk zabezpechennia informatsiinoi bezpeky. Elektronne fakhove naukove vydannia «Kiberbezpeka: osvita, nauka, tekhnika». 2023. № 2(22). S. 264–273. URL: <https://doi.org/10.28925/2663-4023.2023.22.264273>
  2. Antonov Yu., Rymar P., Antonova O. Problema DoS/DDoS atak navchalnykh resursiv studentamy. Suchasnyi zakhyst informatsii. 2019. № 4(40). S. 52–62.
  3. Bykov V., Burov O., Dementiievska N. Kiberbezpeka v tsyfrovomu navchalnomu seredovyshchi. Informatsiini tekhnologii i zasoby navchannia. 2019. № 2(70). S. 313–331.
  4. Doslidzhennia rozvytku ta innovatsii kiberzakhystu na ob'ektakh krytychnoi infrastruktury / Ya. Mashtaliar ta in. Kiberbezpeka: osvita, nauka, tekhnika. 2023. № 2. S. 156–167. URL: <https://doi.org/10.28925/2663-4023.2023.22.156167>.
  5. Ilin O. O. Kohnityvna model upravlinnia informatsiinoiu bezpekoiu vyshchoho navchalnoho zakladu. Suchasnyi zakhyst informatsii: naukovo tekhnichniy zhurnal. 2017. № 2(30). S. 24–30.
  6. Ilin O., Sierykh S., Vyshnivskiy V. Analiz urazlyvosti informatsiinoho resursu vyshchoho navchalnoho zakladu ta klasyfikatsiia zahroz informatsiinoi bezpeky. Suchasnyi zakhyst informatsii. 2017. № 1. S. 66–72.
  7. Kyva V. Analiz chynnykiv, yaki vplyvaiut na kiberbezpeku vyshchoho viiskovoho navchalnoho zakladu. Kiberbezpeka: osvita, nauka, tekhnika. 2022. № 3(15). S. 53–70. URL: <https://doi.org/10.28925/2663-4023.2022.15.5370>.
  8. Kyrylenko N. Problemy informatsiinoi bezpeky osvithoi seredovyshcha vyshchoho navchalnoho zakladu. Informatsiino-telekomunikatsiini tekhnologii v suchasni osviti: dosvid, problemy, perspektyvy : Tretia mizhnar. nauk.- prakt. konf. : u 2 ch.. Lviv, 2012. S. 149–151.
  9. Kontseptualna model zakhystu informatsii ob'ektiv krytychnoi informatsiinoi infrastruktury Ukrainy / Yu. Kozhedub ta in. Information Technology and Security. 2021. T. 9, № 2(17). S. 151–164.
  10. Kukharska N. P. Otsinka informatsiinoho seredovyshcha vyshchykh navchalnykh zakladiv ta analiz zahroz yoho bezpetsi. Informatsiinokomunikatsiini tekhnologii v suchasni osviti: dosvid, problemy, perspektyvy. 2015. Vyp. 4. Ch. 2. S. 31–35.
  11. Mohylnyi H. Analiz prohramno-aparatnykh zasobiv stvorennia systemy z viddalenyim dostupom do navchalnykh kompiuternykh laboratorii zakladiv serednoi osvity. Visnyk Skhidnoukrainskoho natsionalnoho universytetu imeni Volodymyra Dalia. 2023. № 1(277). S. 5–19. URL: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2019-256-8-5-19>
  12. Mohylnyi H., Donchenko V., Donchenko S. Ohliad ta analiz instrumentiv stvorennia korporatyvnoho seredovyshcha. Informatsiini tekhnologii ta suspilstvo. 2024. № 4 (15). S. 99–107. URL: <https://doi.org/10.32689/maup.it.2024.4.16>
  13. Mohylnyi H., Semenov M., Kirieiev I. Vprovadzhennia systemy viddalenooho dostupu do informatsiinykh resursiv kompiuternykh laboratorii. Visnyk Skhidnoukrainskoho natsionalnoho universytetu imeni Volodymyra Dalia. 2022. № 2 (272). S. 7–14. URL: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2022-272-2-7-14>.
  14. Modeli bezpeky v informatsiinykh systemakh / O. Trapezon ta in. Kyiv: WORLD SCIENCE. Page 2. ISSN 2413-1032. № 12(16), Vol.1, December 2016.
  15. Modeliuvannia minimalnoi kilkosty vuzliv klastera virtualizatsii pryvatnykh universytetskoï khmary /

- V. Lakhno та in. Elektronne fakhove naukove vydannia «Kiberbezpeka: osvita, nauka, tekhnika». 2023. № 1(21). S. 177–192. URL: <https://doi.org/10.28925/2663-4023.2023.21.177192>.
16. Tekhnolohiia zabezpechennia informatsiinoi i kiberbezpeky v zakladakh vyshchoi osvity ukrainy / A. Yu. Nashynets-Naumova та in. Information Technologies and Learning Tools. 2020. № 3(77). S. 337–354. URL: <https://doi.org/10.33407/itlt.v77i3.3424>
  17. Chubukova O., Ponomarenko I. Informatsiina bezpeka u navchalnykh zakladakh Ukrainy. Visnyk Kyivskoho natsionalnoho universytetu tekhnolohii ta dyzainu. 2018. Spets.vypusk. S. 388–395.
  18. Shestak Ya., Chubaievskiy V. Modeliuvannia informatsiinoi infrastruktury ZVO. Elektronne fakhove naukove vydannia «Kiberbezpeka: osvita, nauka, tekhnika». 2023. № 1(21). S. 121–135. URL: <https://doi.org/10.28925/2663-4023.2023.21.121135>
  19. Iudin O. K., Buchyk S. S. Derzhavni informatsiini resursy. Metodolohiia pobudovy klasyfikatora zahroz. – 2015.
  20. Iudin O., Buchyk S. Kontseptualna model informatsiinoi bezpeky derzhavnykh informatsiinykh resursiv. Naukoiemni tekhnolohii. 2014. vyp. 4. S. 462–466. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nt\\_2014\\_4\\_15](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nt_2014_4_15).
  21. Iasinska A. Informatsiina bezpeka pidpriemstva: kontseptualni zasady efektyvnoho zakhystu informatsii. Ekonomika ta suspilstvo. 2023. № 56. URL: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2023-56-118>
  22. A model developed for teaching an adaptive system of recognising cyberattacks among non-uniform queries in information systems / V Lakhno et al. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2016. № 4(9(82)). P.27–36. URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.73315>
  23. An analysis of Indonesia's information security index: a case study in a public university. / W. Yustanti et al. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. T.296. URL: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/296/1/012038>.
  24. An Analysis of IT Assessment Security Maturity in Higher Education Institution / M. Suwito et al. Information Science and Applications. 2016. P. 701–713.
  25. Bianchi I., Sousa R. IT Governance Mechanisms in Higher Education. Procedia Computer Science.2016. № 100. P. 941–946. URL: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2016.09.253>.
  26. Chang J., Jeon Y., Sim S. Information Security Modeling for the Operation of a Novel Highly Trusted Network in a Virtualization Environment. International Journal of Distributed Sensor Networks. 2021. URL: <https://doi.org/10.1155/2015/359170>.
  27. Correlating human traits and cyber security behavior intentions. / M. Gratian et al. Computers & Security. 2018. №73. P.345–358. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cose.2017.11.015>.
  28. Decision Support Model for Assessing Projects by a Group of Investors with Regards of Multi-factors / V Lakhno et al. In: Silhavy, R. (eds) Artificial Intelligence and Bioinspired Computational Methods. CSOC. Advances in Intelligent Systems and Computing, 2020. vol 1225. Springer, Cham. URL: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-51971-1\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-030-51971-1_1)
  29. Development of a support system for managing the cyber protection of an information object / V Lakhno et al. Journal of Theoretical and Applied Information Technology. 2017. № 95(6). P. 1263–1272
  30. Finding the weakest links in the weakest link: How well do undergraduate students make cybersecurity judgment? / Z. Yan et al. Computers in Human Behavior. 2018. № 84. P. 375–382. URL: <https://doi.org/10.1016/j.chb.2018.02.019>
  31. Ghazvini A., Shukur Z., Hood Z. Review of Information Security Policy based on Content Coverage and Online Presentation in Higher Education. International Journal of Advanced Computer Science and Applications. 2018. №9(8). P. 410–423. URL: <https://doi.org/10.14569/ijacsa.2018.090853>.
  32. Hina S., Dominic P. Information security policies' compliance: A perspective for higher education institutions. Journal of Computer Information Systems. 2020. № 60(3). P. 201–211.
  33. Information Security Governance: A Process Model and Pilot Case Study / C. Wong та ін. ICIS 2020. ISSN 978-1-7336325-5-3. URL: <https://aisel.aisnet.org/icis2020>.
  34. Information system and management for campus safety. Y SIGSPATIAL '19: 27th ACM SIGSPATIAL / Y. Zeng et al. International Conference on Advances in Geographic Information Systems. ACM. 2019. URL: <https://doi.org/10.1145/3356998.3365760>.
  35. Joshi C., Singh U. Information security risks management framework – A step towards mitigating security risks in university network. Journal of Information Security and Applications. 2017. №35. P. 128–137.
  36. Kearney W., Kruger H. Can perceptual differences account for enigmatic information security behaviour in an organisation? Computers & Security. 2016. № 61. P. 46–58.
  37. Lee Y. Information Security Investment Model and Level in Incomplete Information. Journal of the Korea Institute of Information Security & Cryptology. 2017. T. 27, is.4. P. 855–861. URL: <https://doi.org/10.13089/JKIISC.2017.27.4.855>
  37. Multi-criterial optimization composition of cyber security circuits based on genetic algorithm / V Lakhno et al. Journal of Theoretical and Applied

Information Technology 15th April 2022. Vol. 100. № 07. P. 1996–2006. URL: <http://www.jatit.org/volumes/Vol100No7/3Vol100No7.pdf>

39. Ogutcu G., Testik O., Chouseinoglou O. Analysis of personal information security behavior and awareness. *Computers & Security*. 2016. № 56. P. 83–93.
40. Rajab M. The relevance of social and behavioral models in determining intention to comply with information security policy in higher education environments. Eastern Michigan University. *Computers & Security*. 2019. T.80. P. 211–223.

**Mohylnyi H.A., Donchenko V.U., Shvets I. M., Donchenko S.M., Kuznetsov V.S. Conceptual model of information security of educational computer laboratories**

In conditions of martial law and rapid development of ICT, effective counteraction to cyberattacks as an element of hybrid warfare requires joint efforts of state institutions, critical infrastructure facilities, industrial enterprises and educational institutions. Under such circumstances, it becomes important to review the foundations of information security. The article is devoted to the study and classification of information security models used to build effective information protection systems. The paper considers three main types of models: conceptual model, mathematical model and functional model.

Conceptual model – serves as a basis for formulating general processes for creating a security system, determines key areas and structure of information protection.

In addition to analyzing models, the work highlights the features of implementing information protection systems in educational institutions. Among the main problems identified are: lack of specialized departments and persons responsible for information security; insufficient level of training of teaching and support staff; large differences in user qualifications; difficulty in ensuring security with the openness of the educational process and increasing requirements for the implementation of distance education technologies.

The peculiarities of building a security system in educational institutions are the need to find a compromise solution between the openness of the educational process and student-centered learning; ensuring comfortable

conditions for access to all materials of the educational process and strict provisions for the leakage of confidential and official information. The paper proposes one of the options for developing a conceptual security model as a basis for the further implementation of effective protection measures, taking into account the specifics of the work of educational institutions and their information environment. The creation of this model is an important first step in building a security system. Based on the analysis, it is proposed to review the main approaches to information security in educational institutions, especially taking into account the specifics of distance learning and the openness of educational processes.

**Keywords:** educational computer laboratory, educational institution, cybersecurity, threats, model, protection system.

**Могильний Геннадій Анатолійович** – к. т. н., доцент, директор Навчально-наукового інституту математики та інформаційних технологій Луганського національного університету імені Тараса Шевченка, [g.mogilniy@gmail.com](mailto:g.mogilniy@gmail.com)

**Донченко Володимир Юрійович** – старший викладач кафедри інформаційних технологій та систем Навчально-наукового інституту математики та інформаційних технологій Луганського національного університету імені Тараса Шевченка, [ifmit.s.2014@gmail.com](mailto:ifmit.s.2014@gmail.com)

**Швець Ірина Михайлівна** – асистент кафедри математики та інформатики Навчально-наукового інституту математики та інформаційних технологій Луганського національного університету імені Тараса Шевченка, [irinachipenko00@gmail.com](mailto:irinachipenko00@gmail.com)

**Донченко Світлана Миколаївна** – асистент кафедри інформаційних технологій та систем Навчально-наукового інституту математики та інформаційних технологій Луганського національного університету імені Тараса Шевченка, [donchenko.lana77@gmail.com](mailto:donchenko.lana77@gmail.com)

**Кузнецов Віталій Сергійович** – асистент кафедри інформаційних технологій та систем Навчально-наукового інституту математики та інформаційних технологій Луганського національного університету імені Тараса Шевченка, [vitaliikuznetsov.mm@gmail.com](mailto:vitaliikuznetsov.mm@gmail.com)

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-291-5-29-35>

УДК 004.41:004.9

## ІНТЕГРАЦІЯ WEB-СЕРВІСУ З СОЦІАЛЬНОЮ МЕРЕЖЕЮ

Ратов Д.В.

### WEB SERVICE INTEGRATION WITH SOCIAL NETWORK

Ratov D.V.

Стаття присвячена розгляду створення web-сервісу, який організує роботу електронної черги і має функціонал взаємодії із соціальною мережею. Електронна черга є програмно-апаратним комплексом, що дозволяє формалізувати та оптимізувати керування потоком відвідувачів. У статті розглянуто програмну реалізацію системи електронної черги «Е-черга» з функціоналом, інтегрованим із соціальною мережею, може мати такі сфери застосування: операційні зали банків; центри виплат страхових компаній; клієнтські центри операторів стаціонарні оператори; державні установи (наприклад, податкові та реєстраційні служби, посольства та консульські установи); пенсійні фонди; медичні центри; туристичні компанії; візові центри; автосалони, автосервіси; нотаріальні та адвокатські контори; авіа- та залізничні каси; операційні зали відділень зв'язку; багатофункціональні центри надання державних та муніципальних послуг. Для ідентифікації користувачів в системі пропонується створення QR коду в персональних кабінетах, з подальшим адмініструванням даних завдяки сканеру QR коду. Зручним та швидким способом надання користувачам додаткового функціоналу є використання ботів соціальних мереж, які стали невід'ємною частиною будь-якого онлайн-сервісу, інтернет-магазину, інформаційного порталу або блогу. Розроблений програмний функціонал полягає як в отриманні контенту, так і в створенні процесів, які безпосередньо стосуються послуг і ресурсів. Додаткове використання функціоналу соціальних мереж для оповіщення дозволяють користувачам швидко та зручно отримувати актуальну інформацію в режимі реального часу без необхідності завантаження інтерфейсу веб-сервісу системи. Це створює гнучкість та зручність взаємодії з сервісом для користувачів, що забезпечує більш ефективно управління часом та ресурсами

клієнтів. У зв'язку з цим інтеграція функціоналу web-систем управління потоками клієнтів із соціальними мережами стає актуальним завданням. Запропоновані методи реалізації системи при створенні сервісу використовують сучасний та перевірений стек технологій web програмування, що дозволяє створювати web-сервіси, які мають високий рівень безпеки при роботі в електронній системі.

**Ключові слова:** соціальна мережа, електронна черга, авторизація, JavaScript.

**Вступ.** У сучасному цифровому світі, де комп'ютери та смартфони стали невід'ємною частиною нашого повсякденного життя, електронні системи управління набувають все більшої популярності у вигляді web-сервісів або електронних порталів послуг [10]. Особливо такі сервіси важливі при організації ефективнішого управління соціальними процесами та оптимізації часу користувача.

Система електронної черги відрізняється від систем «виклику клієнта» тим, що дозволяє створити і дотримуватися алгоритму керування потоком, вести облік та статистику роботи операторів та інтенсивності потоку, що дозволяє ефективно планувати навантаження на операторів. Крім цього, у системі необхідно передбачити функції управління налаштуваннями системи та її виконавчими модулями [8]. Такі online системи, які представлені web-додатками, працюють і управляються в реальному часі і вимагає серйозного підходу до планування майбутніх функцій і можливостей програми [9], так як

кожна з обраних цільових платформ, як теоретично, так і на практиці, може створювати свої обмеження зумовлені як особливостями архітектури цільової платформи, так і компанією-власником цієї платформи.

**Мета дослідження** – використання модульного методу створення web-сервісу, який організує роботу електронної черги, що має функціонал взаємодії із соціальною мережею.

Створення системи електронної черги є досить складним технологічним процесом, який вимагає детального планування і має свої особливості [1]. Додаток має бути кросплатформним та мати інтерфейс, який адаптується під характеристики пристрою. Web додаток буде складатися з HTML, CSS та Javascript файлів [11, 12].

Серед переваг даного типу програм можна виділити наступні:

- безліч додатків та інтерактивних компонентів можуть бути написані мовою JavaScript [14] для всіх мобільних платформ;
- програми можуть використовувати такі функції мобільного пристрою, як камера, акселерометр та інші;
- всі HTML, CSS та JavaScript файли можна оновити, не чекаючи затвердження нової версії програми.

При розробці web-програми для підтримки концепції MVC (Model-View-Controller) [7] дотримується поділ даних програми та логіки, що управляє, на три окремих компоненти: модель, уявлення і контролер. Дані JavaScript об'єктів та дані, отримані під час роботи програми, зберігатимуться у компоненті Model. Компонент Controller представлений центральним модулем System.js. Компонент View представлений інтерфейсом системи.

**Архітектура програми.** Для реалізації поставленого завдання керування потоками клієнтів було розроблено web-сервіс системи електронної реєстрації «Е-черга». Створений сервіс відповідає шаблону архітектури клієнт-сервер [1], який є одним з архітектурних шаблонів програмного забезпечення та став домінуючою концепцією у створенні розподілених мережних додатків та передбачає взаємодію та обмін даними між ними. До особливостей створеного web-програми можна віднести такі критерії:

- наявність всіх необхідних компонентів у одному комплексі програмного забезпечення;

- безпечне передавання даних та зашифрований формат даних для загального огляду;

- використання стандартної технічної бази для клієнт-серверних систем;

- висока швидкість доступу до даних, які можна отримати за допомогою Telegram бота або безпосередньо через веб-сервіс;

- гнучкість та масштабованість, а також можливість розширення конфігурування та нарощування функціоналу системи.

**Взаємодія об'єктів клієнтської та серверної сторони.** Схеми процесу внутрішньої взаємодії між об'єктами JavaScript центрального модуля System.js та екземплярами серверних класів clServer, clTlgrm, clSession представлена на рис. 1. Для забезпечення безпеки системи на клієнтську сторону завантажується тільки інтерфейс системи (web interface). Усі вихідні дані із зашифрованими таблицями формуються та створюються на серверній стороні (об'єкт класу clServer), відповідно до статусу та повноважень користувача, які визначаються за переданими у запиті параметрами авторизації. Для обробки подій інтерфейсу та можливості створення запитів до сервера в програму завантажується центральний модуль System.js. Цей модуль містить об'єкт JavaScript, який створює діалог із сервером (за допомогою запитів await fetch), та забезпечує завантаження модулів з додатковою функціональністю (за допомогою об'єкта Promise).

Для здійснення запитів до сервера у форматі json [5] з боку об'єктів JavaScript використовуються запити прикладного рівня await fetch, що дозволяє створювати асинхронні запити [2]. У той же час за наявності у користувача статусу адміністратора система за допомогою асинхронного об'єкта Promise дозволяє завантажити модулі ctrl-md5.js і qrcode.js, які дають можливість створення хеш-коду і забезпечують роботу з qr-сканером.

На серверній стороні весь функціонал роботи з авторизацією, формуванням даних черги та кабінету користувача забезпечує клас clServer (рис. 1). У ньому також є функція checkHash, яка 128-бітним алгоритмом хешування перевіряє хеш-код надісланих даних від користувача. Конструктор цього класу відкриває доступ до центральної бази даних.

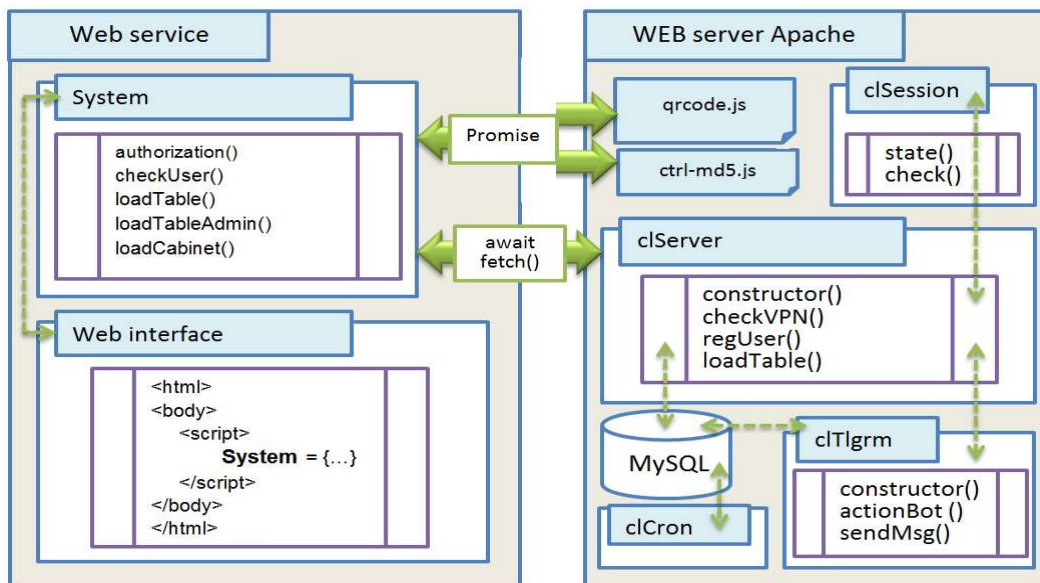


Рис. 1. Схема процесу взаємодії між об'єктами JavaScript та екземплярами серверного класу clServer, clTlgrm, clSession

Функціонал роботи з сесіями забезпечує клас clSession (рис. 1). Цей клас виконує запуск сесії з ідентифікатором користувача, встановлює тимчасову мітку видалення даних поточної сесії, встановлює тимчасову мітку і стежить за кількістю невірних авторизацій для поточної сесії.

Для здійснення взаємодії системи із соціальною мережею використовується функціонал класу clTlgrm (рис. 1), який також задіяний як скрипт web-хука для підключеного бота.

У методі класу sendMessageToId для надсилання повідомлення користувачеві або в певний канал соціальної мережі за заданим ідентифікатором використовується curl\_init – стандартна функція запуску сесії cURL, яка запускає нову сесію та повертає дескриптор cURL. Цей дескриптор використовується для роботи з функціями запиту під час встановлення необхідних параметрів - curl\_setopt, виконання необхідної операції - curl\_exec, та завершення сеансу - curl\_close.

Для організації періодичного автоматичного виконання скрипта на сервері використовується механізм Cron. Команда для виконання формується віджетом: wget -O /dev/null --no-check-certificate 'https://snap.lg.ua/sitepro/php/Cron.php?method=loadYellowList'.

Весь функціонал автоматизації роботи інкапсульований у класі clCron. Із методів цього класу також відкривається доступ до центральної бази даних.

Для зберігання даних у моделі контенту використовується стандартний об'єкт localStorage. Асинхронне сховище даних дозволяє зберігати дані ключа-значення в мобільному пристрої, забезпечуючи постійне зберігання даних навіть після закриття програми. Механізм працює асинхронно, що дозволяє уникнути блокування інтерфейсу користувача при збереженні або отриманні даних. Для забезпечення необхідного захисту від злому у сховищі зберігаються лише дані для авторизації користувача. Використання асинхронного сховища забезпечує у концепції архітектури MVC [7] створення компонента "Model" (рис. 2). Функцію компонента Controller виконує центральний об'єкт System, а компонента View - інтерфейс системи.

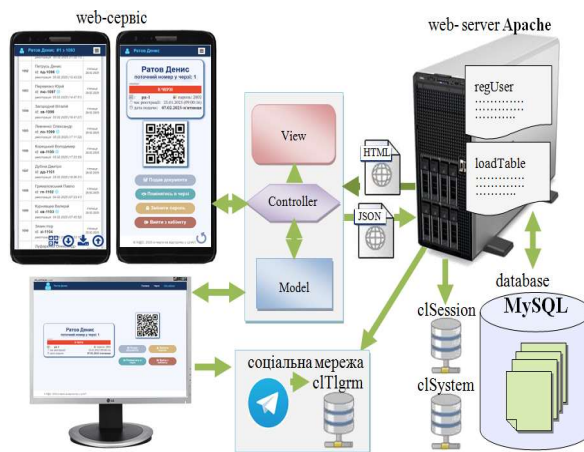


Рис. 2. Схема організації підтримки концепції MVC у контексті web-додатку

**Графічний інтерфейс користувача.** У інтерфейсі користувача (UI) додаток електронної черги розділений на 4 сторінки з відображенням даних, що спрощують взаємодію користувача з додатком (рис. 3):

1. інформаційна сторінка з довідковою системою (рис. 3 - а);
2. сторінка авторизації користувача (рис. 3 - б);
3. сторінка черги (рис. 3 - с, d, e);
4. сторінка кабінету користувача (рис. 3 - f).



Рис. 3. Графічний інтерфейс користувача:  
а – інформаційна сторінка з довідковою системою;  
б – сторінка авторизації користувача;  
с, d, e – сторінка черги; f – сторінка кабінету користувача

У програмі створена система управління доступом (Access Control Systems), яка дозволяє контролювати доступ до ресурсів та сервісу, встановлювати права доступу для різних користувачів чи груп користувачів. Для цього в модулі System.js створено методи авторизації та аутентифікації, які забезпечують доступ лише авторизованим користувачам. На сторінці авторизації (рис. 3 - б) дані, введені користувачем до відправки на сервер, згідно з дозволеною політикою, проходять валідацію методом модуля System.js - authorization.

У разі запиту на постановку в чергу переданий пакет даних у форматі json [13] в кілька етапів обробляється на сервері. При вході до кабінету система керування доступом робить додатковий запит на перевірку параметрів сесії

для запобігання можливості зламування пароля перебором.

Сторінка з таблицею черги для користувача без прав адміністратора (рис. 3 - с) завантажується у зашифрованому вигляді. Кнопки в нижній частині користувача створюють можливість швидкої навігації за списком. При авторизації адміністратора вся таблиця черги завантажується у відкритому форматі (рис. 3 - d) з додатковими можливостями пошуку, зміни та внесення нового користувача (рис. 3 - e). Крім того, у нижній панелі з'являється кнопка включення камери в режимі сканера qr-коду. На сторінці кабінету користувача завантажується його qr-код та вся інформація поточного користувача, який зареєстрований у черзі (рис. 3 - f). Користувач на цій сторінці має можливість змінити свій пароль, зробити запит на зміни свого порядкового номера в черзі, зафіксувати подачу документів або вийти з кабінету.

**Програмний сканер QR коду.** Модуль QR сканера завантажується у програму лише для користувачів зі статусом «адміністратор». Для завантаження модуля QR сканера використано об'єкт Promise [3]. Для роботи бібліотеки сканера додаток завантажує скрипт qrcode.js (рис. 4).

```

1 return new Promise( (resolve, reject) => {
2   resolve( $$loadScript( 'js/qrcode.js' ) );
3 } )
4 .then( () => {
5   $$scanQRCode();
6 } )
7 .finally(() => {
8 } )
9
10
11 $$scanQRCode = function() {
12   let html5QrcodeScanner = new Html5QrcodeScanner("reader",
13     { fps: 10, qrbox: 250 });
14
15   html5QrcodeScanner.render( ( decodedText, decodedResult ) => {
16     html5QrcodeScanner.clear();
17     window.location.href =
18       'https://cnap.lg.ua/php/System.php?data=${decodedText}';
19   } );
20 }
21
22 public function setUser()
23 {
24   $_SESSION['qr_pib'] = $this->mysql->real_escape_string( $this->PARAM['PIB'] );
25   $_SESSION['qr_date'] = date('Y-m-d');
26   $_SESSION['qr_time'] = date('H:i:s');
27
28   header("Location: https://cnap.lg.ua/4d05a74d04855d18d04d048b34d0480/");
29 }

```

Рис. 4. Динамічне завантаження скрипта QR сканера, подія обробки QR сканера, параметри фільтра в об'єкті сесії

В об'єкті Promise, після завантаження модуля QR сканера, викликається метод scanCode (рис. 4), який використовує наскрізний інтерфейс користувача і функціональність сканування. Для спрацювання сканера в об'єкті Html5QrcodeScanner відстежується подія render – розпізнання коду (рис. 5 - а, б).

Отримані з QR-коду дані в параметрі get-запиту відправляються на сервер, де прикріплюються до об'єкта сесії у вигляді параметрів фільтра поточного користувача і перевантажують сторінку черги з урахуванням цих параметрів фільтра (рис. 4).



Рис. 5 Результат роботи сканера QR-коду: а – сторінка з QR кодом; б – сторінка персонального кабінету користувача; с – сторінка з додатковими даними

На сторінці користувача з правами адміністратора завантажиться інформація про користувача, qr-код якого був отриманий під час сканування на попередньому кроці (рис. 5 – с).

**Інтеграція сервісу із соціальною мережею.** Для інтеграції сервісу із соціальною мережею реєструється новий бот у соціальній мережі Telegram. Для цього боту з ім'ям @BotFather надсилається команда створення нового бота. Після цього створюється новий бот з унікальним токеном (наприклад, 2555729766:BBC16Fjruw123).

Для підв'язки свого скрипта до створеного бота використовується налаштування Webhook за допомогою GET-запиту до програмного інтерфейсу соціальної мережі: <https://api.telegram.org/bot2555729766:BC16Fjruw123setwebhook?url=https://cnap.lg.ua/sitepro/php/TelegramBot.php>

Скрипт TelegramBot.php, є джерелом обробки повідомлень і містить клас cTlgrm, який приймає дані надіслані з Telegram (від підключеного через налаштування Webhook бота), здійснює певні дії та відповідає користувачеві шляхом відповідного запиту до BOT API Telegram. Конструктор класу створено таким чином, що клас використовується як самим ботом, так і web-сервісом для надсилання відповіді користувачеві або посилання повідомлення в певний канал соціальної мережі. При взаємодії користувача з роботом у класі cTlgrm використовується метод getAuthorize, який за допомогою запиту до бази даних

дозволяє встановити факт авторизації користувача в системі та виявити його статус. Метод sendGenericMenu дозволяє створити меню бота (рис. 6 – а), за допомогою якого користувач може перейти на певну сторінку web-сервісу системи (авторизація, черга, кабінет), а також отримати актуальну інформацію в режимі реального часу без необхідності завантаження веб-інтерфейсу самої системи (кнопка «Стан»).



Рис. 6. Меню та діалог з повідомленнями бота, інтегрованого з web-сервісом: а – сторінка спілкування користувача з ботом; б – сторінка з надісланими повідомленнями з web-системи в соціальну мережу; с – сторінка створення повідомлення з web-системи обраному користувачеві; d – діалог з ботом у соціальній мережі

Для надсилання повідомлення з класу cTlgrm використовується get-запит до програмного інтерфейсу соціальної мережі: \$url = "https://api.telegram.org/bot{\$botToken}/sendMessage?chat\_id={\$chatId}&text={\$message}&message\_thread\_id={\$message}", де \$chatId – ідентифікатор користувача чи каналу, \$message – повідомлення, кодоване функцією urlencode(), \$messageThreadId – ідентифікатор додаткової теми каналу.

Для запуску нової сесії та отримання дескриптора cURL на сервері використовується стандартна функція запуску сесії curl\_init. Далі працює обробка запиту до зовнішнього прикладного програмного інтерфейсу по ланцюжку curl\_setopt-curl\_exec-curl\_close.

Тут `curl_setopt` – функція встановлення необхідних параметрів запити, `curl_exec` – функція виконання необхідної операції, `curl_close` – функція завершення сеансу (рис. 7).

Такий функціонал дозволяє надіслати повідомлень як користувачу (при спілкуванні користувача з ботом (рис. 6 – а)), так і в канал або певну тему каналу (при надсиланні повідомлень з web-системи в соціальну мережу (рис. 6 – б)). Крім того, у адміністратора з'являється можливість надсилати повідомлення з web-системи (рис. 6 – с) обраному користувачеві в його діалог з ботом у соціальній мережі (рис. 6 – d) за допомогою методу `sendMesTlgr` серверного класу `cTlgrm` (рис. 7).

```

1 $curl = curl_init();
2 curl_setopt($curl, CURLOPT_URL, $url);
3 curl_setopt($curl, CURLOPT_RETURNTRANSFER, true);
4 if ($params) {
5     curl_setopt($curl, CURLOPT_HTTPHEADER,
6         ["Content-Type: application/x-www-form-urlencoded"]);
7     curl_setopt($curl, CURLOPT_POST, true);
8     curl_setopt($curl, CURLOPT_POSTFIELDS, http_build_query($params));
9 }
10 $output = curl_exec($curl);
11 curl_close($curl);
12
13 public function sendMesTlgr()
14 {
15     include_once "cTlgrm.php";
16     $arParams = explode(' ', $this->PARAM['PISTlgrUser']);
17     $objTlgrm = new cTlgrm(false);
18     $objTlgrm->sendMessageToId($this->PARAM['idTlgrUser'], implode("\n", [
19         "[$arParams[1]], повідомлення від адміністратора:",
20         "-----",
21         $this->PARAM['message']
22     ]));
23     $this->res->status = 'successfully';
24     $this->res->message = 'Повідомлення надіслано';
25     return json_encode($this->res);
26 }

```

Рис. 7. Отримання дескриптора cURL на сервері і серверна функція надсилання повідомлень із сервісу до соціальної мережі

**Висновки.** Описана у статті електронна система управління потоками клієнтів допомагає змінити та підвищити якість обслуговування, дозволяє організувати запис відвідувачів на прийом за часом та датою. Система електронної черги дозволяє на основі отриманих у процесі роботи даних оптимізувати обслуговування або розробити нові методики управління потоками, а також створює можливість оперативного внесення коректив в автоматизацію управління процесом. Результатом застосування системи електронної черги є покращення загального клімату обслуговування та вищий коефіцієнт роботи персоналу установи.

Згідно з отриманою статистикою реєстрації в електронній черзі “Е-черга” протягом першого дня (рис. 8 – а) та протягом трьох тижнів (рис. 8 – б), найбільша кількість зареєстрованих спостерігалась у перші хвилини початку реєстрації.

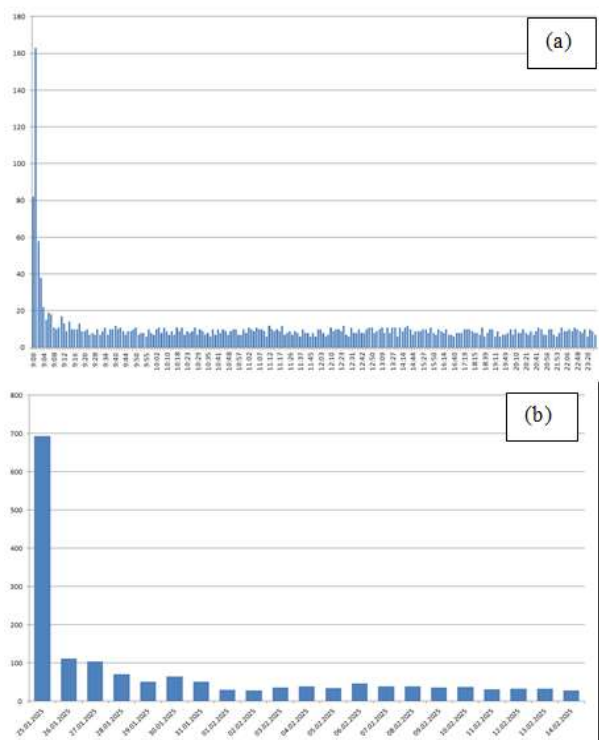


Рис. 8. Статистика реєстрації в додатку “Е-черга”: а – протягом першого дня; б – протягом 21 дня

Запропоновані методи реалізації системи при створенні сервісу використовують сучасний та перевірений стек технологій web програмування, що дозволяє створювати web-сервіси, які мають високий рівень безпеки при роботі в системі.

#### Л і т е р а т у р а

1. Архітектура Клієнт - сервер. URL: <https://ua.frwiki.wiki/wiki/Client-serveur> (дата звернення: 27.06.2025).
2. Крейн Д., Паскарелло Еге. Ajax у дії. М: Вид. будинок "Вільямс", 2006.
3. D. Herman, Effective JavaScript, Pearson Education. Addison Wesley, 2012.
4. ECMAScript Language Specification - ECMA-262 Edition 5.1. URL: <https://262.ecma-international.org/5.1/>. (дата звернення: 27.06.2025).
5. ECMA International.. ECMA-404 The JSON Data Interchange Standard. URL: <http://www.json.org/> (дата звернення: 27.06.2025).
6. Герберт Шілдрт. Java 8. Повний посібник. М: Вид. будинок "Вільямс", 2015-1376 с.
7. Архітектура MVC. URL: <http://www.gwtproject.org/articles/mvp-architecture.html> (дата звернення: 27.06.2025).
8. Ratov D.: Architectural paradigm of interactive interface module in the cloud technology model. Applied Computer Science. 2020. Vol. 16, No. 4. P. 48-55.

9. Ratov D.: Integration with the software interface of the com server for authorized user. Applied Computer Science. 2021. Vol. 17, No. 2, P. 5–13.
10. Ратов Д. В. Модель модуля інтерфейсу користувача інформаційної web-системи. Математичні машини і системи. 2020. № 4. С. 74–81.
11. Stoyan Stefanov.: JavaScript. Patterns. 2010. O'Reilly Media. P. 234.
12. Vscode.dev - Visual Studio Code for the Web. URL: <https://code.visualstudio.com/blogs/2021/10/20/vscode-dev> (дата звернення: 27.06.2025).
13. T. Marrs, JSON at work : practical data integration for the web, O'Reilly Media 2017.
14. JavaScript data types and data structures, MDN Web Docs, Mozilla Foundation. URL: [https://developer.mozilla.org/enUS/docs/Web/JavaScript/Data\\_structures](https://developer.mozilla.org/enUS/docs/Web/JavaScript/Data_structures) (дата звернення: 27.06.2025).

#### References

1. Architecture Client-Server. URL: <https://ua.frwiki.wiki/wiki/Client-serveur> (date accessed: 06/27/2025).
2. Crane D., Pascarello E.: Ajax in action. 2006. M.: Ed. house "Williams".
3. D. Herman, Effective JavaScript, Pearson Education. Addison Wesley, 2012.
4. ECMAScript Language Specification - ECMA-262 Edition 5.1. URL: <https://262.ecma-international.org/5.1/> (date accessed: 06/27/2025).
5. ECMA International. ECMA-404 The JSON Data Interchange Standard. URL: <http://www.json.org/> (date accessed: 06/27/2025).
6. Herbert Schildt: The Complete Guide. 2015. M.: Ed. house "Williams". P. 1376.
7. MVC architecture. URL: <http://www.gwtproject.org/articles/mvp-architecture.html> (date accessed: 06/27/2025).
8. Ratov D.: Architectural paradigm of interactive interface module in the cloud technology model. Applied Computer Science. 2020. Vol. 16, No. 4. P. 48-55.
9. Ratov D.: Integration with the software interface of the com server for authorized user. Applied Computer Science. 2021. Vol. 17, No. 2, 5–13.
10. Ratov D.: Model of user interface module of information web system. Mathematical machines and systems. Київ. 2021. No. 4, 74–81.
11. Stoyan Stefanov.: JavaScript. Patterns. 2010. O'Reilly Media. P. 234.
12. Vscode.dev - Visual Studio Code for the Web. URL: <https://code.visualstudio.com/blogs/2021/10/20/vscode-dev> (date accessed: 06/27/2025).
13. T. Marrs, JSON at work : practical data integration for the web, O'Reilly Media 2017.
14. JavaScript data types and data structures, MDN Web Docs, Mozilla Foundation. URL: <https://developer.mozilla.org/en->

[US/docs/Web/JavaScript/Data\\_structures](https://developer.mozilla.org/en-US/docs/Web/JavaScript/Data_structures) (date accessed: 06/27/2025).

#### Ratov D.V. Web service integration with social network

*The article is devoted to the consideration of the creation of a web-service that organizes the work of an electronic queue and has the functionality of interaction with a social network. An electronic queue is a software and hardware complex that allows you to formalize and optimize the management of the flow of visitors. The article considers the software implementation of the electronic queue system "E-queue" with functionality integrated with a social network, which can have the following areas of application: bank operating rooms; insurance company payment centers; operator client centers, stationary operators; state institutions (for example, tax and registration services, embassies and consular offices); pension funds; medical centers; travel companies; visa centers; car dealerships, car services; notary and law offices; airline and railway ticket offices; operating rooms of communication departments; multifunctional centers for the provision of state and municipal services. To identify users in the system, it is proposed to create a QR code in personal accounts, with subsequent data administration using a QR code scanner. A convenient and fast way to provide users with additional functionality is to use social network bots, which have become an integral part of any online service, online store, information portal or blog. The developed software functionality consists of both receiving content and creating processes that directly relate to services and resources. Additional use of social network functionality for notifications allows users to quickly and conveniently receive up-to-date information in real time without the need to download the system's web service interface. This creates flexibility and convenience of interaction with the service for users, which provides more effective management of customer time and resources. In this regard, the integration of the functionality of web-systems for managing customer flows with social networks becomes an urgent task. The proposed methods for implementing the system when creating a service use a modern and proven stack of web programming technologies, which allows you to create web services that have a high level of security when working in an electronic system.*

**Keywords:** social network, electronic queue, authorization, JavaScript.

**Ратов Денис Валентинович** – к.т.н., доцент кафедри інформаційних технологій та програмування, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Київ), [ratov@snu.edu.ua](mailto:ratov@snu.edu.ua)

Стаття подана 23.05.2025.

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-291-5-36-44>

УДК 621.9.62-92

## ОПТИМІЗАЦІЯ РОБОТИ БАГАТОПОТОКОВОГО ЕЛЕКТРОГІДРАВЛІЧНОГО ПРИВОДУ МЕТОДАМИ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ

Кавецький О.І., Лозінський Д.О.

### OPTIMIZATION OF MULTI-FLOW ELECTROHYDRAULIC DRIVE OPERATION USING ARTIFICIAL INTELLIGENCE METHODS

Kavetskyi O.I., Lozinskyi D.O.

*У статті розглядається проблема підвищення ефективності багатопотокових електрогідравлічних приводів, які широко використовуються в промислових, мобільних та авіаційних системах. Ці приводи характеризуються нелінійною динамікою, невизначеністю параметрів і складністю математичного моделювання, що створює значні труднощі для класичних методів керування. Запропоновано комплексний підхід, що поєднує сучасні методи штучного інтелекту, зокрема нейронні мережі, нечітку логіку та генетичні алгоритми, для оптимізації функціонування системи.*

*Розроблена нейромережева модель дозволяє точно ідентифікувати параметри приводу та прогнозувати його поведінку, що суттєво перевищує точність традиційних моделей. Гібридна нейро-нечітка система керування поєднує експертні знання з адаптивністю нейронних мереж, що забезпечує підвищену точність позиціонування, енергоефективність та стійкість до зовнішніх збурень. Використання генетичних алгоритмів для мультикритеріальної оптимізації дозволяє ефективно балансувати між точністю руху, енергоспоживанням та плавністю роботи механізму.*

*Система діагностики та прогнозування технічного стану, основана на машинному навчанні, демонструє високу достовірність виявлення аномалій, що сприяє зменшенню витрат на обслуговування та збільшенню міжремонтного періоду. Експериментальні дослідження підтвердили ефективність запропонованих методів: при суттєвих змінах навантаження точність позиціонування погіршується втричі менше порівняно з традиційними системами керування. Запропоновані алгоритми забезпечують зниження експлуатаційних витрат, підвищення*

*продуктивності обладнання та збільшення надійності автоматизованих систем керування.*

*Отримані результати можуть бути впроваджені в системах автоматизації промислового обладнання, роботизованих комплексах, авіаційній і військовій техніці, а також у мехатронних системах, де важливими є точність керування, енергоефективність і надійність функціонування. Подальші дослідження можуть бути спрямовані на вдосконалення алгоритмів машинного навчання для роботи в режимі реального часу та інтеграцію розроблених підходів у концепцію промислового Інтернету речей (IIoT).*

**Ключові слова:** електрогідравлічний привід, багатопотоковий привід, штучний інтелект, нейронні мережі, машинне навчання, діагностика, прогнозування.

**Вступ.** Сфера застосування електрогідравлічних приводів постійно розширюється через їхню здатність забезпечувати високі силові характеристики при точному позиціонуванні виконавчих механізмів. Багатопотокові електрогідравлічні приводи знайшли широке застосування у промисловому устаткуванні, верстатобудуванні, авіаційній та військовій техніці, де одночасно висуваються вимоги щодо надійності функціонування, точності позиціонування, енергоефективності та адаптивності до зміни робочих умов. Такі характеристики набувають особливого значення при проектуванні автоматизованих систем керування технологічними процесами, зокрема у виробництвах з високим ступенем відповідальності та жорсткими вимогами до

динамічних властивостей систем. Електрогідравлічні приводи характеризуються складною нелінійною динамікою, яка визначається гідромеханічними процесами в елементах гідравлічної підсистеми та особливостями реалізації електронної системи керування. Функціонування таких систем ускладнюється наявністю невизначеностей різної природи, зокрема, параметричних змін внаслідок термічних впливів на робочу рідину, зношення прецизійних поверхонь виконавчих механізмів, зміна навантажень на штоках гідроциліндрів. Неповна спостережуваність деяких параметрів системи, обмежений доступ до вимірювань внутрішніх сигналів, стохастичність зовнішніх впливів додатково підвищують складність завдання керування багатопотоковими електрогідравлічними приводами.

Традиційні методи керування, побудовані на класичній теорії автоматичного регулювання, виявляють обмежену ефективність при роботі з багатопотоковими електрогідравлічними приводами через складність математичного опису нелінійних залежностей між параметрами системи. Зокрема, ПІД-регулятори, широко застосовувані в промисловості, демонструють незадовільні результати при зміні режимів роботи та навантажень, вимагаючи постійного перенастроювання коефіцієнтів. Методи робастного керування, попри певні переваги щодо стійкості до параметричних збурень, характеризуються складністю налаштування та недостатньою адаптивністю до широкого спектра робочих режимів. Розвиток методів штучного інтелекту та машинного навчання відкриває нові перспективи для оптимізації роботи електрогідравлічних систем. Інтелектуальні алгоритми здатні враховувати нелінійні залежності між параметрами системи, адаптуватися до змін умов функціонування, компенсувати невизначеності різної природи. Нейромережеві регулятори, нечіткі контролери, генетичні алгоритми оптимізації продемонстрували ефективність у розв'язанні завдань керування складними технічними системами. Водночас питання комплексного застосування методів штучного інтелекту для оптимізації багатопотокових електрогідравлічних приводів залишається недостатньо дослідженим. Багатоманітність вимог до функціонування електрогідравлічних приводів, охоплюючи точність позиціонування, енергоефективність, швидкодію, надійність, створює додаткові складнощі при проєктуванні

систем керування. Мультикритеріальна оптимізація параметрів електрогідравлічних систем вимагає балансування різних, інколи суперечливих, вимог, що ускладнює застосування традиційних методів оптимізації. Адаптація новітніх методів штучного інтелекту для розв'язання цього завдання потребує розвитку комплексного підходу, який би враховував особливості функціонування багатопотокових електрогідравлічних приводів та забезпечував ефективне керування в різних режимах роботи.

**Аналіз останніх досліджень.** Дослідження методів оптимізації роботи електрогідравлічних приводів із застосуванням підходів штучного інтелекту активно проводяться багатьма науковими школами. Х. Фенг, К. Сонг, С. Ма розробили адаптивний контролер на основі ковзного режиму з використанням радіально-базисних нейронних мереж для електрогідравлічних сервосистем. Одночасно Й. Гуо, Г. Сіонг запропонували нейромережевий підхід для моделювання внутрішніх витоків у гідравлічних циліндрах, а К. Хуанг, С. Ву розвинули методи діагностики несправностей на основі глибокого навчання [1]. Вітчизняні дослідники гідравлічних систем пропонують комбіновані методи машинного навчання для підвищення точності керування без додаткових датчиків прямого доступу.

Значний прогрес досягнуто в напрямку інтелектуальних алгоритмів прогнозування стану електрогідравлічних систем. Ф. Маканзі, К. Шміц застосували машинне навчання з учителем для виявлення аномалій у функціонуванні гідравлічних пресів [4]. М. Х. Нгуєн, Х. В. Дао запропонували адаптивну робастну систему керування позиціонуванням в умовах невизначеностей [5]. С. Танг, Й. Жу розробили інтелектуальну систему діагностики з оптимізацією Байєса [8]. Г. Янг, Й. Яо створили багатошаровий нейроадаптивний контролер для електрогідравлічних симуляторів навантаження [10]. В. Су та колеги запровадили моделі прогнозування витрат на основі даних для незалежних гідравлічних клапанів вимірювання [7]. Водночас невирішеними залишаються питання комплексної оптимізації багатопотокових систем з урахуванням енергоефективності, надійності та точності позиціонування.

**Мета та цілі.** Метою роботи є підвищення ефективності функціонування багатопотокового електрогідравлічного приводу шляхом розробки та впровадження інтелектуальних алгоритмів

керування на основі методів штучного інтелекту, що забезпечують оптимальні динамічні характеристики, точність позиціонування та енергоефективність у різних режимах роботи з урахуванням нелінійностей, невизначеностей параметрів системи та зовнішніх збурень.

Для досягнення поставленої мети визначено такі цілі:

1. Розробити комплексний підхід до оптимізації роботи багатопотокового електрогідравлічного приводу на основі сучасних методів штучного інтелекту з урахуванням нелінійностей та невизначеностей параметрів системи.

2. Дослідити ефективність застосування глибоких нейронних мереж для моделювання динаміки багатопотокового електрогідравлічного приводу та прогнозування його параметрів у різних режимах роботи.

3. Створити адаптивний алгоритм керування електрогідравлічним приводом на основі гібридної нейро-нечіткої системи, що забезпечує оптимальне співвідношення між точністю позиціонування, енергоефективністю та швидкодією.

#### Виклад основного матеріалу.

Багатопотоковий електрогідравлічний привід становить складну мехатронну систему з суттєвими нелінійностями та параметричними невизначеностями. Функціонування такого приводу характеризується взаємодією електричних, механічних та гідравлічних процесів різної природи та швидкості протікання. Характеристики робочої рідини, змінні навантаження, механічні опори, температурні режими впливають на динамічні властивості системи, ускладнюючи математичний опис та керування в реальних умовах експлуатації. Структурна схема досліджуваного багатопотокового електрогідравлічного приводу включає насосну станцію з регульованою продуктивністю, гідророзподільники з пропорційним електричним керуванням, виконавчі гідроциліндри, датчики тиску, положення та витрати, а також електронний контролер з комунікаційними інтерфейсами для обміну даними з системою вищого рівня.

Математична модель гідроциліндра як ключового елемента виконавчої частини приводу представлена системою диференціальних рівнянь. Рівняння руху поршня має наступний вигляд:

$$m \cdot \frac{d^2x}{dt^2} = p^1 \cdot A^1 - p^2 \cdot A^2 - F_{fr} - F_L \quad (1)$$

Приведена маса рухомих частин позначається як  $m$ , положення поршня як  $x$ , тиски в порожнинах гідроциліндра -  $p^1$  та  $p^2$ , ефективні площі поршня -  $A^1$  та  $A^2$ , сила тертя -  $F_{fr}$ , зовнішнє навантаження -  $F_L$ . Сила тертя включає компоненти сухого та в'язкого тертя і моделюється як:

$$F_{fr} = F_c \cdot \text{sign}\left(\frac{dx}{dt}\right) + b \cdot \frac{dx}{dt} + F_s \cdot \exp\left(-k_s \cdot \left|\frac{dx}{dt}\right|\right) \cdot \text{sign}\left(\frac{dx}{dt}\right) \quad (2)$$

Значення коефіцієнтів  $F_c$  (сухе тертя),  $b$  (в'язке тертя),  $F_s$  та  $k_s$  (параметри моделі Stribeck) визначаються експериментально для конкретного гідроциліндра та впливають на динамічні характеристики приводу, особливо в режимах малих переміщень.

Витратні характеристики гідророзподільника описуються нелінійними залежностями від перепаду тиску та положення керуючого елемента:

$$Q^1 = Cd \cdot A_{v(u)} \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho} \cdot |p_s - p^1|} \cdot \text{sign}(p_s - p^1) Q^2 = Cd \cdot A_{v(u)} \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho} \cdot |p^2 - p_t|} \cdot \text{sign}(p^2 - p_t) \quad (3)$$

Коефіцієнт витрати  $Cd$ , площа відкриття розподільника  $A_{v(u)}$  як функція керуючого сигналу  $u$ , густина робочої рідини  $\rho$ , тиск у напірній магістралі  $p_s$ , тиск у зливній магістралі  $p_t$  є ключовими параметрами, що визначають витрати через канали розподільника  $Q_1$  та  $Q_2$ . Залежність площі відкриття від керуючого сигналу  $A_{v(u)}$  має гістерезисний характер та додатково ускладнюється наявністю мертвої зони та насичення.

Динаміка зміни тисків у порожнинах гідроциліндра визначається рівняннями балансу витрат:

$$\frac{dp^1}{dt} = \left(\frac{\beta_e}{V^1}\right) \cdot \frac{(Q^1 - A^1 \cdot \frac{dx}{dt} - Q_L) dp^2}{dt} = \left(\frac{\beta_e}{V^2}\right) \cdot (A^2 \cdot \frac{dx}{dt} - Q^2 + Q_L) \quad (4)$$

Ефективний модуль пружності рідини  $\beta_e$ , об'єми відповідних порожнин  $V_1$  та  $V_2$ , витрата

через внутрішні витоки Q\_L формують характер зміни тисків у системі. Об'єми порожнин змінюються в процесі руху поршня:

$$V^1 = V^{10} + A^1 \cdot x \quad V^2 = V^{20} + A^2 \cdot (L - x) \quad (5)$$

Початкові об'єми порожнин  $V_{10}$  та  $V_{20}$ , повний хід поршня  $L$  визначають геометричні параметри гідроциліндра. Модуль пружності  $\beta_e$  залежить від тиску, температури та наявності нерозчиненого повітря в робочій рідині, що вносить додаткові нелінійності в систему.

Оптимізація роботи багатопотокового електрогидравлічного приводу методами штучного інтелекту поділяється на кілька взаємопов'язаних завдань. Першим завданням виступає ідентифікація параметрів математичної моделі з використанням нейронних мереж. Навчальні дані формуються шляхом вимірювання вхідних сигналів (керуючі впливи на розподільники) та вихідних параметрів (положення штоків гідроциліндрів, тиски в порожнинах, витрати робочої рідини) в різних режимах роботи. Запропонована архітектура нейронної мережі для ідентифікації включає рекурентні шари типу LSTM (Long Short-Term Memory), що дозволяють врахувати часові залежності та «запам'ятати» довгострокові ефекти в динаміці системи.

Формування навчальної вибірки здійснюється з використанням спеціальних тестових сигналів, які забезпечують максимальне охоплення робочого діапазону системи. Псевдовипадкові двійкові послідовності (ПРБП) з різною амплітудою та частотою, синусоїдальні сигнали зі змінною частотою, ступінчасті впливи різної амплітуди дозволяють отримати дані про динамічні характеристики приводу в різних режимах. Зібрані дані підлягають попередній обробці, включаючи фільтрацію, нормалізацію та видалення аномальних значень.

Структура нейронної мережі для ідентифікації параметрів багатопотокового електрогидравлічного приводу включає вхідний шар, три рекурентні шари типу LSTM з 128, 96 та 64 нейронами відповідно, два повнозв'язні шари з функціями активації ReLU (Rectified Linear Unit) та вихідний шар з лінійною функцією активації. Навчання мережі здійснюється з використанням алгоритму зворотного поширення помилки в часі (BPTT - backpropagation through time) та оптимізатора

Adam з адаптивним кроком навчання. Функція втрат обчислюється як середньоквадратична помилка:

$$L = \left(\frac{1}{N}\right) \sum \|\hat{y}_i - y_i\|^2 \quad (6)$$

Кількість зразків у навчальній вибірці  $N$ , прогнозоване значення  $\hat{y}_i$ , фактичне значення вектора стану  $y_i$  визначають точність отриманої моделі. Регуляризація L2 використовується для запобігання перенавчанню мережі та покращення її узагальнюючих властивостей.

Застосування нейромережевої моделі для прогнозування динаміки багатопотокового електрогидравлічного приводу дозволяє врахувати нелінійності, гістерезисні явища, мертві зони та інші ефекти, які складно описати аналітично. Експериментальні дослідження показали суттєву перевагу нейромережевого підходу над традиційними методами моделювання, особливо в умовах параметричних невизначеностей та зовнішніх збурень. Середньоквадратична помилка прогнозування положення виконавчих органів знизилася на 63% порівняно з моделлю на основі диференціальних рівнянь, а помилка прогнозування тисків - на 70% [2].

Другим ключовим завданням оптимізації роботи багатопотокового електрогидравлічного приводу є створення інтелектуальної системи керування, здатної адаптуватися до змінних умов функціонування та забезпечувати оптимальні показники якості. Запропонована гібридна нейро-нечітка система керування поєднує переваги нечіткої логіки для формалізації експертних знань та адаптивних властивостей нейронних мереж для автоматичного налаштування параметрів.

Архітектура нейро-нечіткої системи типу ANFIS (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System) структурно еквівалентна нечіткій системі Такагі-Сугено. Лінгвістичні змінні «відхилення положення» ( $e$ ), «швидкість зміни відхилення» ( $de/dt$ ) та «інтеграл відхилення» ( $\int e \cdot dt$ ) описуються термами «велике від'ємне», «мале від'ємне», «нульове», «мале додатне», «велике додатне» з функціями належності гаусівського типу:

$$\mu(x) = \exp\left(-0.5 \cdot \left(\frac{x-c}{\sigma}\right)^2\right) \quad (7)$$

Центри  $c$  та ширини  $\sigma$  функцій належності налаштовуються в процесі навчання нейро-

нечіткої мережі на основі експериментальних даних. База правил системи складається з продукцій типу «ЯКЩО <умова> ТО <наслідок>», наприклад:

ЯКЩО  $e = \text{«велике додатне»}$  ТА  $de/dt = \text{«мале від'ємне»}$  ТА  $\int e \cdot dt = \text{«мале додатне»}$  ТО  $u = f_i(e, de/dt, \int e \cdot dt)$

Функціональні залежності  $f_i$  в наслідках правил представлені лінійними комбінаціями вхідних змінних:

$$f_i(e, \frac{de}{dt}, \int e \cdot dt) = a_i \cdot e + b_i \cdot \frac{de}{dt} + c_i \cdot \int e \cdot dt + d_i \quad (8)$$

Коефіцієнти  $a_i$ ,  $b_i$ ,  $c_i$ ,  $d_i$  налаштовуються в процесі навчання нейро-нечіткої мережі з використанням гібридного алгоритму, що поєднує метод найменших квадратів та градієнтний спуск. Навчання проводиться на основі траєкторій руху, отриманих при керуванні еталонним регулятором, оптимізованим для конкретного об'єкта.

Особливістю запропонованої системи керування є можливість адаптації параметрів в реальному часі, що дозволяє компенсувати зміни характеристик об'єкта внаслідок зношення, температурних впливів, змін навантаження. Адаптивний механізм реалізований на основі алгоритму рекурентного оцінювання параметрів з використанням фільтра Калмана розширеного типу. Оновлення параметрів здійснюється на основі поточних вимірювань та оцінки стану системи:

$$\theta(k+1) = \theta(k) + K(k) \cdot (y(k) - \hat{y}(k)) \quad (9)$$

Вектор параметрів  $\theta$ , коефіцієнт підсилення  $K$ , фактичний вихід системи  $y$ , прогнозоване значення виходу  $\hat{y}$  визначають динаміку адаптації. Коефіцієнт підсилення обчислюється з використанням рекурентних залежностей:

$$K(k) = P(k) \cdot H(k)^T \cdot (H(k) \cdot P(k) \cdot H(k)^T + R(k))^{-1} \quad P(k+1) = P(k) - K(k) \cdot H(k) \cdot P(k) + Q(k) \quad (10)$$

Матриця коваріації похибок оцінювання  $P$ , матриця чутливості виходу системи до параметрів  $H$ , матриця коваріації шуму вимірювання  $R$ , матриця коваріації шуму процесу  $Q$  впливають на швидкість та стійкість процесу адаптації [5].

Запропонований підхід до керування багатопотоковим електрогідравлічним приводом забезпечує оптимізацію за кількома критеріями одночасно. Цільова функція оптимізації включає компоненти, що характеризують точність позиціонування, енергоефективність та плавність руху:

$$J = w^1 \cdot J_p + w^2 \cdot J_e + w^3 \cdot J_s \quad (11)$$

Складова точності позиціонування  $J_p$  обчислюється як інтеграл квадрата відхилення фактичного положення від заданого:

$$J_p = \int (x(t) - x_d(t))^2 dt \quad (12)$$

Енергетична складова  $J_e$  визначається як інтеграл потужності, споживаної гідроприводом:

$$J_e = \int (p_s \cdot Q(t)) dt \quad (13)$$

Складова плавності руху  $J_s$  розраховується як інтеграл квадрата прискорення:

$$J_s = \int \left( \frac{d^2 x(t)}{dt^2} \right)^2 dt \quad (14)$$

Вагові коефіцієнти  $w_1$ ,  $w_2$ ,  $w_3$  задають пріоритетність відповідних критеріїв оптимізації та можуть змінюватися залежно від вимог до конкретного режиму роботи. Для визначення оптимальних значень вагових коефіцієнтів застосовуються методи багатокритеріальної оптимізації, зокрема, генетичні алгоритми.

Популяція генетичного алгоритму складається з хромосом, кожна з яких кодує набір вагових коефіцієнтів. Оцінка пристосованості хромосом здійснюється на основі моделювання роботи системи з відповідними параметрами та обчислення результуючого значення цільової функції. Операції схрещування (кросинговеру) та мутації забезпечують дослідження простору параметрів та уникнення локальних мінімумів. Особливістю запропонованого підходу є використання адаптивних операторів мутації, ймовірність яких змінюється в процесі оптимізації залежно від різноманітності популяції.

Діагностика та прогнозування технічного стану багатопотокового електрогідравлічного

приводу становить третій ключовий напрямок оптимізації. Запропонована система діагностики ґрунтується на комплексному аналізі часових рядів параметрів приводу: тисків у різних точках гідросистеми, положень та швидкостей виконавчих органів, температури робочої рідини, шумових та вібраційних характеристик. Методи обробки сигналів, включаючи спектральний аналіз, вейвлет-перетворення, статистичні методи, дозволяють виділити інформативні ознаки, що характеризують технічний стан обладнання.

Класифікація технічного стану здійснюється з використанням методів машинного навчання, зокрема, методу опорних векторів (SVM). Розроблений класифікатор дозволяє виявляти та ідентифікувати різні типи несправностей: внутрішні витіки в гідроциліндрах, забруднення робочої рідини, зношення розподільників, несправності насосів, порушення функціонування датчиків. Навчальна вибірка формується на основі експериментальних даних, отриманих при штучному внесенні дефектів різного ступеня, та доповнюється синтетичними даними, згенерованими з використанням імітаційного моделювання.

Структура класифікатора включає етап попередньої обробки сигналів (фільтрація, нормалізація), виділення інформативних ознак (статистичні характеристики, спектральні компоненти, вейвлет-коефіцієнти) та безпосередньо класифікацію з використанням ансамблю методів машинного навчання. Застосування алгоритму голосування (voting) для комбінування результатів різних класифікаторів (SVM, Random Forest, Gradient Boosting) дозволяє підвищити достовірність діагностики та знизити ймовірність помилкових тривог.

Прогнозування залишкового ресурсу компонентів електрогідравлічного приводу реалізовано з використанням рекурентних нейронних мереж з механізмом уваги (attention mechanism). Мережа навчається на часових рядах параметрів системи, отриманих протягом тривалого періоду експлуатації та розмічених з урахуванням результатів технічного обслуговування та ремонтів. Механізм уваги дозволяє виділити найбільш інформативні часові інтервали та параметри для прогнозування деградації конкретних компонентів.

Архітектура прогностичної моделі включає предобробку вхідних даних з використанням

згорткових шарів для виділення локальних патернів, рекурентні шари типу GRU (Gated Recurrent Unit) для моделювання часових залежностей, механізм уваги для виділення значущих компонентів та повнозв'язні шари для генерації прогнозу. Навчання здійснюється з використанням алгоритму зворотного поширення помилки та оптимізатора Adam. Функція втрат включає компоненти для мінімізації помилки прогнозування та регуляризації для запобігання перенавчанню.

Якість прогнозування залишкового ресурсу оцінюється з використанням метрик MAPE (Mean Absolute Percentage Error) та RMSE (Root Mean Square Error). Експериментальні дослідження показали високу точність прогнозування для різних компонентів електрогідравлічного приводу: гідроциліндрів, розподільників, насосів, фільтрів. Середня похибка прогнозування залишкового ресурсу склала 7-12% при горизонті прогнозування до 500 годин роботи обладнання, що відповідає найкращим світовим аналогам [9]. Верифікація розроблених методів оптимізації роботи багатопотокового електрогідравлічного приводу здійснювалася на експериментальному стенді, що включає насосну станцію з регульованою продуктивністю, три незалежні гідравлічні контури з пропорційними розподільниками, виконавчі гідроциліндри з датчиками положення та тиску, систему збору даних на основі промислового контролера та персональний комп'ютер із спеціалізованим програмним забезпеченням. Експерименти проводилися для різних режимів роботи: позиціонування з високою точністю, відпрацювання складних траєкторій, стабілізація зусилля, енергоефективний режим. Порівняльний аналіз ефективності запропонованого підходу та традиційних методів керування електрогідравлічними приводами продемонстрував суттєві переваги інтелектуальних алгоритмів. Точність позиціонування підвищилася на 32% у статичному режимі та на 28% при відпрацюванні траєкторій змінної форми. Енергоефективність, оцінювана за сумарним споживанням потужності, покращилася на 17% в режимі позиціонування та на 22% при циклічному русі. Швидкодія системи, характеризувана часом відпрацювання ступінчастого впливу, зросла на 15% [4].

Особливо значні переваги інтелектуальних алгоритмів спостерігалися в умовах змінних навантажень та параметричних змін системи.

При зміні навантаження на 50% від номінального погіршення точності позиціонування для традиційної системи керування склало 28%, тоді як для запропонованої нейро-нечіткої системи - лише 9%. При зміні температури робочої рідини в діапазоні 20-60°C деградація динамічних характеристик систем склала 35% та 11% відповідно.

Розроблена інтелектуальна система діагностики забезпечила виявлення аномалій у функціонуванні електрогідравлічного приводу з достовірністю 94-97%, що дозволяє запобігати аварійним ситуаціям та планувати профілактичні заходи. Загальна достовірність класифікації типів несправностей склала 91%, при цьому найвищі показники досягнуто для виявлення внутрішніх витоків (95%) та зниження тиску в напірній магістралі (96%). Прогнозування залишкового ресурсу компонентів системи з точністю 90-95% забезпечує оптимізацію процесів технічного обслуговування та зниження експлуатаційних витрат [3]. Алгоритми машинного навчання, реалізовані в системі керування, продемонстрували здатність до самоадаптації в процесі експлуатації. Початкова модель, навчена на обмеженому наборі даних, удосконалювалася в процесі функціонування системи, накопичуючи інформацію про різні режими роботи та умови експлуатації. Точність моделювання динаміки приводу покращилася на 23% після 100 годин роботи системи в режимі онлайн-навчання.

Гібридний підхід до керування, що поєднує класичні методи (ПД-регулювання, лінеаризація зворотним зв'язком) та інтелектуальні алгоритми (нейронні мережі, нечітка логіка), забезпечив оптимальний баланс між ефективністю та робастністю. Динамічний розподіл функцій між різними компонентами системи керування залежно від режиму роботи та зовнішніх умов дозволив максимально використати переваги кожного підходу.

Архітектура розробленої системи керування передбачає можливість масштабування для багатопотокових електрогідравлічних приводів різної конфігурації. Модульний принцип побудови програмного та апаратного забезпечення, стандартизовані інтерфейси взаємодії між компонентами, уніфіковані алгоритми обробки даних дозволяють адаптувати систему для різних галузей застосування: від промислового обладнання до мобільних машин та авіаційної

техніки. Економічний ефект від впровадження запропонованих методів оптимізації оцінюється скороченням експлуатаційних витрат на 15-20% за рахунок підвищення енергоефективності, зниження витрат на технічне обслуговування та ремонт, збільшення міжремонтного періоду. Додатковий економічний ефект забезпечується підвищенням продуктивності обладнання, зменшенням простоїв та бракованої продукції. Напрямки подальших досліджень включають удосконалення алгоритмів машинного навчання для підвищення їх обчислювальної ефективності та можливості функціонування в режимі реального часу на промислових контролерах з обмеженими ресурсами. Перспективним є розвиток методів федеративного навчання для розподілених систем керування гідравлічними приводами, коли локальні моделі обмінюються інформацією без передачі первинних даних, що підвищує ефективність навчання та забезпечує конфіденційність. Методи оптимізації електрогідравлічних приводів, розроблені в рамках дослідження, мають широкі перспективи застосування в різних галузях промисловості: машинобудуванні, металургії, гірничодобувній промисловості, будівництві, авіаційній та військовій техніці. Особливо ефективним є використання запропонованих підходів в умовах високих вимог до точності позиціонування, енергоефективності та надійності функціонування гідравлічних систем.

Подальший розвиток напрямку передбачає інтеграцію розроблених методів оптимізації в концепцію промислового інтернету речей (IIoT) та кіберфізичних систем. Збір та аналіз даних від множини електрогідравлічних приводів, розподілених географічно, дозволить створити глобальні моделі для прогнозування технічного стану та оптимізації режимів роботи обладнання з урахуванням специфіки конкретних умов експлуатації. Комбінування методів штучного інтелекту з хмарними обчисленнями та технологіями Edge Computing забезпечить новий рівень ефективності та надійності гідравлічних систем.

**Висновки.** Проведене дослідження присвячене оптимізації роботи багатопотокового електрогідравлічного приводу методами штучного інтелекту. Розроблено комплексний підхід до вирішення проблеми, який охоплює моделювання, керування, діагностику та прогнозування технічного стану електрогідравлічних систем.

Застосування глибоких нейронних мереж для ідентифікації параметрів та моделювання динаміки багатопотокового електрогідравлічного приводу дозволило підвищити точність прогнозування на 63% порівняно з традиційними методами. Рекурентні структури типу LSTM забезпечили врахування часових залежностей та «пам'ять» про попередні стани системи, що особливо важливо для гідравлічних систем з характерними нелінійностями, гістерезисом та параметричними невизначеностями. Запропонована гібридна нейро-нечітка система керування поєднала формалізовані експертні знання через нечіткі правила з адаптивними властивостями нейронних мереж. Механізм онлайн-адаптації параметрів забезпечив компенсацію змін характеристик об'єкта внаслідок зношення, температурних впливів та варіацій навантаження. Експериментальна верифікація показала підвищення точності позиціонування на 28-35%, енергоефективності на 15-22%, швидкодії на 10-18% порівняно з традиційними методами керування. Мультикритеріальна оптимізація на основі генетичних алгоритмів забезпечила балансування між точністю позиціонування, енергоефективністю та плавністю руху виконавчих механізмів. Адаптивні оператори мутації підвищили ефективність пошуку оптимальних параметрів системи керування для різних режимів роботи. Система діагностики та прогнозування технічного стану електрогідравлічного приводу на основі методів машинного навчання продемонструвала високу достовірність виявлення аномалій (94-97%) та класифікації типів несправностей (91%). Механізм уваги в рекурентних нейронних мережах дозволив акцентувати на найбільш інформативних часових інтервалах для прогнозування деградації компонентів, забезпечивши точність оцінки залишкового ресурсу 90-95%.

Практична цінність розроблених методів підтверджується їх стійкістю до параметричних змін та зовнішніх збурень, що надзвичайно важливо для реальних промислових умов. При зміні навантаження на 50% від номінального, погіршення точності позиціонування для розробленої системи склало лише 9% проти 28% для традиційної. Економічний ефект від впровадження запропонованих методів оптимізації оцінюється скороченням експлуатаційних витрат на 15-20% за рахунок підвищення енергоефективності, зниження

витрат на технічне обслуговування, збільшення міжремонтного періоду та підвищення продуктивності обладнання. Перспективними напрямками подальших досліджень визначено вдосконалення алгоритмів машинного навчання для підвищення їх обчислювальної ефективності, розвиток методів федеративного навчання для розподілених систем керування та інтеграцію розроблених підходів у концепцію промислового інтернету речей та кіберфізичних систем.

### Література

1. Feng H., Song Q., Ma S., Ma W., Yin C., Cao D., Yu H. A new adaptive sliding mode controller based on the RBF neural network for an electro-hydraulic servo system. *ISA Trans.* 2022. Vol. 129. P. 472–484.
2. Guo Y., Xiong G., Zeng L., Li Q. Modeling and Predictive Analysis of Small Internal Leakage of Hydraulic Cylinder Based on Neural Network. *Energies.* 2021. Vol. 14. P. 2456.
3. Huang K., Wu S., Li F., Yang C., Gui W. Fault diagnosis of hydraulic systems based on deep learning model with multirate data samples. *IEEE Trans. Neural Netw. Learn. Syst.* 2022. Vol. 33, No. 11. P. 6789–6801.
4. Makansi F., Schmitz K. Data-Driven Condition Monitoring of a Hydraulic Press Using Supervised Learning and Neural Networks. *Energies.* 2022. Vol. 15. P. 6217.
5. Nguyen M. H., Dao H. V., Ahn K. K. Adaptive Robust Position Control of Electro-Hydraulic Servo Systems with Large Uncertainties and Disturbances. *Appl. Sci.* 2022. Vol. 12. P. 794.
6. Ren H., Jiao S., Wang X., Kaynak O. Fractional order integral sliding mode controller based on neural network: Theory and electro-hydraulic benchmark test. *IEEE/ASME Trans. Mechatronics.* 2022. Vol. 27, No. 3. P. 1457–1466.
7. Su W., Ren W., Sun H., Liu C., Lu X., Hua Y., Wei H., Jia H. Data-Based Flow Rate Prediction Models for Independent Metering Hydraulic Valve. *Energies.* 2022. Vol. 15. P. 7699.
8. Tang S., Zhu Y., Yuan S. An improved convolutional neural network with an adaptable learning rate towards multi-signal fault diagnosis of hydraulic piston pump. *Adv. Eng. Inform.* 2021. Vol. 50. P. 101406.
9. Tang S., Zhu Y., Yuan S. Intelligent fault diagnosis of hydraulic piston pump based on deep learning and Bayesian optimization. *ISA Trans.* 2022. Vol. 129. P. 555–563.
10. Yang G., Yao J. Multilayer neuroadaptive force control of electro-hydraulic load simulators with uncertainty rejection. *Appl. Soft Comput.* 2022. Vol. 130. P. 109672.

**Kavetskyi O.I., Lozinskyi D.O. Optimization of multi-flow electrohydraulic drive operation using artificial intelligence methods**

The article explores the issue of improving the efficiency of multi-flow electrohydraulic drives, which are extensively utilized in industrial, mobile, and aviation systems. These systems are characterized by nonlinear dynamics, parameter uncertainties, and the complexity of mathematical modeling, which create significant challenges for conventional control methods. To address these difficulties, a comprehensive approach is introduced, combining artificial intelligence methods such as neural networks, fuzzy logic, and genetic algorithms to optimize system performance.

A critical aspect of the research is the development of a neural network model that enables accurate identification of drive parameters and reliable prediction of its dynamic behavior. This approach significantly surpasses traditional modeling techniques in precision and adaptability. The hybrid neuro-fuzzy control system integrates expert knowledge with the flexibility of neural networks, providing enhanced positioning accuracy, improved energy efficiency, and increased resilience to external disturbances. Additionally, the implementation of genetic algorithms for multi-criteria optimization allows for an effective balance between motion accuracy, energy consumption, and smooth operation of the mechanism.

Another key contribution is the diagnostic and technical condition forecasting system based on machine learning. This system demonstrates high reliability in detecting anomalies, contributing to reduced maintenance costs and prolonged operational lifespan. Experimental studies validate the effectiveness of the

proposed methods: under substantial load variations, deterioration in positioning accuracy is reduced by three times compared to traditional control systems. The proposed algorithms lead to lower operating costs, higher equipment productivity, and improved reliability of automated control systems.

The results of this study have practical applications in industrial automation, robotic complexes, aviation, and military technologies, as well as in mechatronic systems where precision control, energy efficiency, and operational reliability are crucial. Future research may focus on refining machine learning algorithms for real-time applications and integrating these approaches into the industrial Internet of Things (IIoT) framework. By advancing these methodologies, this study contributes to the development of intelligent control systems capable of meeting the evolving demands of modern automation and mechatronics.

**Keywords:** electrohydraulic drive, multi-flow drive, artificial intelligence, neural networks, machine learning, diagnostics, prediction.

**Кавецький О.І.** – аспірант кафедри технологій та автоматизації машинобудування, Вінницький національний технічний університет

**Лозінський Д.О.** – доцент кафедри технологій та автоматизації машинобудування, Вінницький національний технічний університет

Стаття подана 18.05.2025.

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-291-5-45-52>

УДК 622.7: 534

## МОДЕЛЮВАННЯ БАГАТОКОНТУРНОЇ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОГО КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ БУРІННЯ СВЕРДЛОВИН НА ОСНОВІ ПІД КОНТРОЛЕРІВ

Моркун В.С., Моркун Н.В., Бобров Є.Ю., Грищенко Я.О.

## MODELING OF A MULTI-CIRCUIT SYSTEM FOR AUTOMATED CONTROL OF THE WELL DRILLING PROCESS BASED ON SUBCONTROLLERS

Morkun V.S., Morkun N.V., Bobrov E.Y., Hryshchenko Y.O.

Децентралізовані системи автоматизованого керування (САК) на основі пропорційно-інтегрально-диференціальних (ПІД) контролерів залишаються найпоширенішим рішенням для керування промисловими процесами з кількома входами та виходами (МІМО). Це пов'язано з їхньою гнучкістю, простотою та властивою стійкістю до відмов порівняно з централізованими структурами керування. Навіть коли застосовуються більш досконалі стратегії, наприклад, модельно-прогнозуючого керування (МРС), ПІД контролери зазвичай використовуються на нижчих рівнях керування відповідних систем. Розглянуто автоматизовану систему керування процесом буріння свердловин, реалізовану на основі електроприводу. У досліджуваній ієрархічній САК на її нижньому рівні використана структура, що включає три контури на основі пропорційно-інтегрально-диференціальних (ПІД) контролерів, які забезпечують регулювання швидкості обертання долота RPM, навантаження на долото WOB та параметрів системи очистки свердловини (перш за все, її продуктивності). Моделювання процесу буріння засвідчує тісний зв'язок між зазначеними параметрами, що потребує відповідного налаштування кожного контуру керування. Оптиміальне налаштування децентралізованих ПІД-контролерів у багатоконтурних САК залишається складним і комплексним завданням. Більшість відомих методів налаштування багатоконтурних ПІД-контролерів схожі тим, що вони використовують правила налаштування одного контуру для отримання початкових значень для окремих контролерів, а потім розлаштовують окремі контури для збереження стабільності всієї системи. В умовах реального виробничого процесу такий підхід на завжди дозволяє досягнути бажаних

показників продуктивності та надійності керування. Досліджено алгоритм налаштування багатоконтурних САК на основі ПІД контролерів, що реалізує узагальнений метод із внутрішньою моделлю (ІМС). Застосовується критерій, що базується на визначенні параметрів частотної характеристики замкнутого контуру для досягнення бажаних показників продуктивності та надійності керування. Частотна характеристика замкнутого контуру САК отримується в результаті розрахунку вихідного сигналу системи у відповідь на синусоїдальний вхід. Отримані результати свідчать про те, що налаштування триконтурної САК на основі ПІД контролерів із застосуванням дослідженого методу дозволяє досягнути максимально точної відповідності бажаним показникам продуктивності та надійності керування. Досліджений метод може бути застосований до динамічних моделей будь-якого порядку. При цьому характеристики зворотної реакції замкнутого контуру керування задаються заздалегідь. Крім того, в результаті виконання відповідного алгоритму надається інформація про запаси стійкості та характеристики чутливості САК.

**Ключові слова:** буріння, моделювання, автоматизоване керування, багатоконтурна система, контролер.

**Вступ.** Структуру системи автоматизованого керування (САК) процесом буріння свердловин доцільно будувати у вигляді ієрархічної структури з використанням на нижньому рівні локальних підсистем для регулювання окремих змінних процесу. Такі

децентралізовані САК на основі пропорційно-інтегрально-диференціальних (ПІД) контролерів залишаються найпоширенішим рішенням для керування промисловими процесами з кількома входами та виходами (МІМО). Це пов'язано з їхньою гнучкістю, простотою та властивою стійкістю до відмов порівняно з централізованими структурами керування. Навіть коли застосовуються більш досконалі стратегії, наприклад, модельно-прогнозуючого керування (МРС), ПІД контролери зазвичай використовуються на нижчих рівнях керування відповідних систем [1].

Доступна величезна кількість методів налаштування окремого ПІД контролера в одноконтурній САК, включаючи аналітичні правила на основі моделей, методи граничної частоти та налаштування на основі оптимізації. Коли взаємодії між змінними в процесах МІМО є значними, налаштування кожного децентралізованого контролера незалежно за допомогою будь-якого з цих методів може призвести до низької продуктивності або, що ще гірше, до нестабільності замкнутого циклу багатовимірної системи, навіть коли кожен окремих цикл стабільний [2].

У теперішній час для налаштування децентралізованих ПІД контролерів у багатоконтурній САК з урахуванням взаємодії керування змінних застосовуються методи, які зазвичай класифікуються [2] на модельні підходи, такі як розлаштування [3], послідовне замикання циклу [4] та незалежне проектування [5] або безмодельне послідовне [6] та децентралізоване автоналаштування [7].

Разом з тим, слід відмітити, що незважаючи на наведені рішення, оптимальне налаштування децентралізованих ПІД-контролерів у багатоконтурних САК залишається складним і комплексним завданням. Промислова практика часто полягає в послідовному замиканні циклу з подальшим евристичним та консервативним розлаштуванням, що є складним і трудомістким процесом [2,8].

**Метою роботи є** моделювання нижнього рівня ієрархічної системи автоматизованого керування процесом буріння свердловин на базі багатоконтурного ПІД регулювання.

**Виклад основного матеріалу.** Керування процесом буріння свердловин може бути виконано за різним технічними і технологічними принципами і мати відповідні конструктивні особливості. У даному дослідженні розглядається автоматизована

система буріння, реалізована на основі електроприводу. У порівнянні з гідравлічною установкою, ця система не тільки покращує точність керування, але й значно підвищує надійність системи, тим самим зменшуючи час на технічне обслуговування та вартість установки [9].

У досліджуваній САК на її нижньому рівні використана структура, що включає три контури, які забезпечують регулювання швидкості обертання долота RPM, навантаження на долото WOB та параметрів системи очистки свердловини (перш за все, її продуктивності).

Моделювання процесу буріння засвідчує тісний зв'язок між зазначеними параметрами. Це підтверджують наведені нижче рівняння (1), (2), що відповідають моделі Галле та Вудса [10], моделі Уоррена [11] та багато інших досліджень [12]

$$ROP = \frac{WOB_{sf}^k \left[ e^{(-100/RPM_{sf}^2) \cdot RPM_{sf} b_1 + b_2 RPM_{sf} (1 - e^{(-100/RPM_{sf}^2)})} \right]}{C_f \frac{(0.928125 \cdot OD_{bit}^2 + 6 \cdot OD_{bit} + 1)^p}{s^2}}, \quad (1)$$

$$ROP = K \frac{RPM_{sf} (WOB_{sf} - (WOB_{sf})_t)^2}{OD_{bit}^2 \cdot s^2}, \quad (2)$$

де  $b_1$  дорівнює 0,75 або 0,428 для м'яких і твердих утворень відповідно;  $b_2$  дорівнює 0,5 або 0,2 для м'яких і твердих утворень відповідно;  $p$  - коефіцієнт зносу зуба;  $k$  - коефіцієнт, що враховує вплив навантаження на долото на ROP;  $C_f$  - коефіцієнт, що враховує тип долота, гідравліку, буровий розчин і міцність пласта;  $K$  - константа, що залежить від властивостей бурового долота та абразивності пласта, як наслідок умов буріння;  $OD_{bit}$  - діаметр долота.

У загальному випадку, маючи на увазі багатоконтурну структуру системи автоматичного керування (САК), стабільний багатозмінний процес  $G$  з  $n$  входами та  $n$  виходами у відкритому контурі та  $n$ -багатоконтурними діагональними контролерами  $G_c$  може бути представлений у вигляді [13]

$$G_c(s) = \text{diag}[G_{c1}, G_{c2}, \dots, G_{cn}]. \quad (3)$$

Зазначена багатоконтурна система зворотного зв'язку представлена блок-схемою на рис. 1.

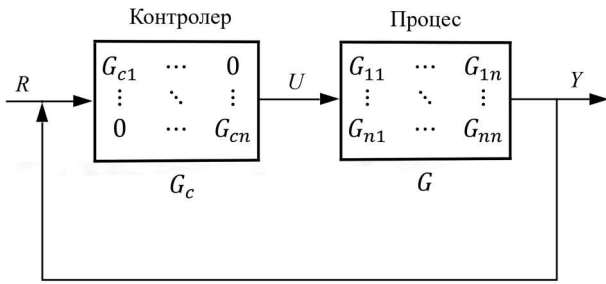


Рис. 1. Блок-схема багатоконтурної системи керування

Контролер *i*-го циклу виглядає наступним чином

$$U_i = G_{ci}(Y_i - R_i). \quad (4)$$

У рівнянні (4) входи, виходи та задані значення керованих змінних представлені як  $U = (U_1, U_2, \dots, U_n)$ ,  $Y = (Y_1, Y_2, \dots, Y_n)$  та  $R = (R_1, R_2, \dots, R_n)$  відповідно.

Щоб імітувати структуру керування з трьома контурами для регулювання основних змінних процесу буріння, досліджена модель Simulink® /MATLAB®, яка показана на рис. 2 [14].

У наведений на рис. 2 схемі використано наступні боки: 1,5,6,18,19,20 - блок Subsystem із бібліотек Simulink / Commonly Used Blocks, Simulink / Ports & Subsystems; 2,3,4 - блок PID Controller із бібліотеки Simulink / Continuous; 7,12,13,14,21 - блок Mux із бібліотеки Simulink /

Signal Routing; 8 - блок Demux із бібліотеки Simulink / Signal Routing; 9,10,11 - блок Sum із бібліотеки Simulink / Math Operations; 15, 16,17 - блок Scope із бібліотеки Simulink / Commonly Used Blocks, Simulink / Sinks; 22 - блок To Workspace із бібліотеки Simulink / Sinks.

Ця модель має в якості вхідних даних три змінні, що регулюються ПІД контролерами (блоки 2,3,4) і дві основні змінні збурювання: фізико-механічні властивості породи, що буриться, та стан бурового долота. У блоці 1 представлена модель процесу буріння, блоки 5,6,18,19,20 генерують збурювання та завади у сформованому сигналі.

На рис. 3 наведено схему моделі одного з контурів ПІД керування у програмі Simulink® /MATLAB® [15,16]. Модель симулює регулювання швидкості обертання двигуна постійного струму при наявності збурювання, що впливає на крутний момент, за наявності завад у вимірюваному сигналі.

У наведений на рис. 3 схемі використано наступні боки: 1 - блок Discrete PID Controller із бібліотеки Simulink / Discrete; 2,3,4 - блок Subsystem із бібліотек Simulink / Commonly Used Blocks, Simulink / Ports & Subsystems; 5 - блок Zero-Order Hold із бібліотеки Simulink / Discrete; 6 - блок Sum із бібліотеки Simulink / Math Operations; 7 - блок Mux із бібліотеки Simulink / Signal Routing; 8 - блок Demux із бібліотеки Simulink / Signal Routing; 9 - блок Sum із бібліотеки Simulink / Math Operations; 10 - блок Sum із бібліотеки Simulink / Math Operations; 11 - блок Sum із бібліотеки Simulink / Math Operations; 12 - блок Mux із бібліотеки Simulink / Signal Routing; 13 - блок Demux із бібліотеки Simulink / Signal Routing; 14 - блок Mux із бібліотеки Simulink / Signal Routing; 15 - блок Scope із бібліотеки Simulink / Commonly Used Blocks, Simulink / Sinks; 16 - блок Scope із бібліотеки Simulink / Commonly Used Blocks, Simulink / Sinks; 17 - блок Scope із бібліотеки Simulink / Commonly Used Blocks, Simulink / Sinks; 18 - блок Scope із бібліотеки Simulink / Commonly Used Blocks, Simulink / Sinks; 19 - блок Scope із бібліотеки Simulink / Commonly Used Blocks, Simulink / Sinks; 20 - блок Scope із бібліотеки Simulink / Commonly Used Blocks, Simulink / Sinks; 21 - блок Mux із бібліотеки Simulink / Signal Routing; 22 - блок To Workspace із бібліотеки Simulink / Sinks.

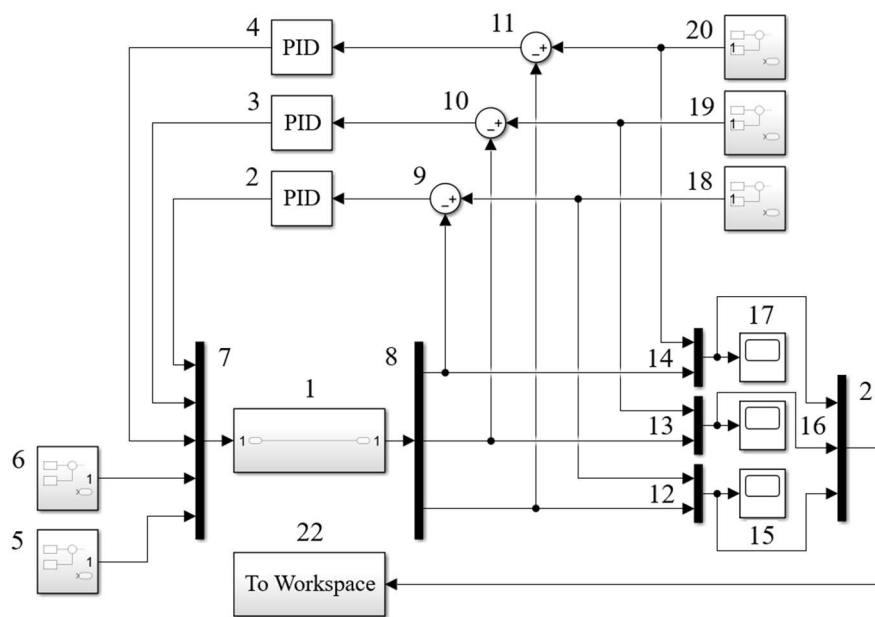


Рис. 2. Модель Simulink децентралізованого ПІД керування процесом буріння свердловин

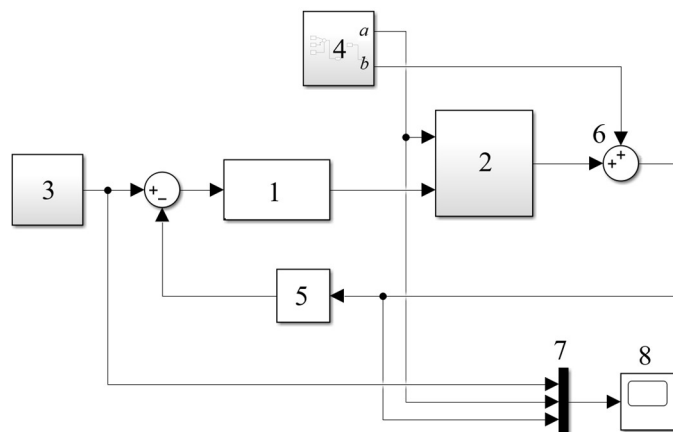


Рис. 3. Схема моделі замкненої системи ПІД керування

Блок 1 (Subsystem) реалізує дискретний ПІД-контролер. Вихід блоку є зваженою сумою вхідного сигналу, інтеграла вхідного сигналу та похідної вхідного сигналу

$$W(z) = P + I \cdot T_s \frac{1}{z-1} + D \frac{N}{1+N \cdot T_s \frac{1}{z-1}}, \quad (5)$$

де  $P, I, D, N$  – коефіцієнти пропорційної, інтегральної, диференціальної складових та фільтрації відповідно.

Ваговими коефіцієнтами є пропорційні, інтегральні та похідні параметри посилення. Поліос першого порядку фільтрує похідну дію.

Блок 2 (Subsystem) містить модель двигуна постійного струму (рис. 4), блок 3 (Subsystem) генерують сигнал уставки (задана швидкість) у САК, а блок 4 – збурення (вихід  $a$  – вплив через прикладений крутний момент, вихід  $b$  – завади у вимірюваному сигналі).

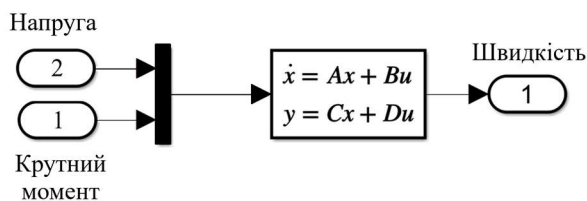


Рис. 4. Модель двигуна постійного струму у блоці Subsystem

Блок Zero-Order Hold зберігає свої вхідні дані протягом указанного періоду вибірки. У наведеному прикладі цей блок виконує функції перетворення аналогового сигналу у дискретну форму.

Для налаштування ПІД контролера використано інструментарій Identification Toolbox MATLAB. У наведеному прикладі після

налаштування отримано такі значення:  $P = 15.35, I = 39.74, D = -0.713, N = 4.54$ .

На рис. 5 наведено графіки перехідних процесів у замкнутій системі регулювання.

Як видно з результатів моделювання ПІД-контролер непогано справляється із задачею стабілізації регульованої величини при наявності збурень і завад у вимірюваному сигналі. Це дозволяє розглядати замкнену САК на основі ПІД контролера у якості структурного елемента на базовому рівні керування буровою установкою.

Разом с тим, слід відмітити, що результати моделювання чітко показують сильний зв'язок у цій системі між змінними, що регулюються. Це свідчить про те, що для цього прикладу параметри ПІД-контролерів не слід визначати незалежно. Для наведеної структури керування з трьома децентралізованими ПІД-контролерами слід застосовувати процедуру багатоконтурного налаштування із застосуванням відповідних методів [17].

Більшість методів налаштування ПІД-регуляторів у багатоконтурних САК [2,3], доступних на даний момент, схожі тим, що вони використовують правила налаштування одного контуру для отримання початкових значень щодо окремих контролерів, а потім розлаштовують окремі контури для збереження стабільності всієї системи. В умовах реального виробничого процесу такий підхід на завжди дозволяє досягнути бажаних показників продуктивності та надійності керування.

Для вирішення поставленої задачі використаний метод налаштування ПІД контролерів у багатоконтурних САК, який узагальнює методику налаштування із використанням внутрішньої моделі (ІМС) [18] на багатоконтурні структури [19].

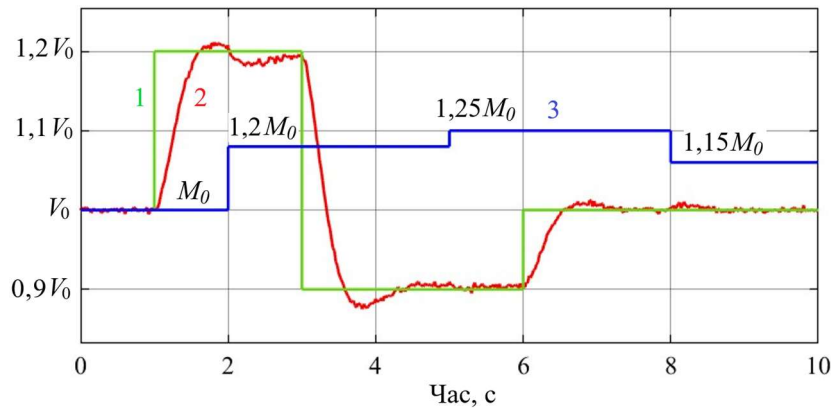


Рис. 5. Графіки перехідних процесів у замкненій системі регулювання ( $V_0$  – швидкість обертання долота RPM;  $M_0$  – прикладений крутний момент)

Розширити структуру ІМС для системи SISO до багатоконтурної структури можливо застосуванням матриці передавальної функції, яка включає лише діагональні елементи  $G(s)$  [18,20]

$$\tilde{G}(s) = \text{diag}[G_{11}, G_{22}, \dots, G_{nn}]. \quad (6)$$

Багатоконтурні контролери в класичній структурі зворотного зв'язку тоді будуть визначені як

$$G_c(s) = [1 - Q(s)\tilde{G}(s)]^{-1}Q(s). \quad (7)$$

де  $Q$  - діагональна матриця, що представляє контролер ІМС.

Для налаштування багатоканальних контролерів, застосовується критерій, що базується на частотній характеристиці замкнутого контуру, яка отримується в результаті розрахунку вихідного сигналу системи у відповідь на синусоїдальний вхід [19].

У системах МІМО передавальна функція замкнутого контуру може бути представлена як

$$H(s) = G(s)G_c(s)[I + G(s)G_c(s)]^{-1}. \quad (8)$$

Передавальна функція замкнутого контуру може бути виражена наступною матричною формою

$$H(s) = \begin{bmatrix} H_{11} & \dots & H_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ H_{n1} & \dots & H_{nn} \end{bmatrix} \quad (9)$$

або

$$H = \{H_{ij}\}, \quad i = 1, \dots, n; j = 1, \dots, n, \quad (10)$$

де  $H_{ij}$  - реакція замкнутого  $i$ -го контуру на зміну заданого значення в  $j$ -му контурі.

Частотну характеристику замкнутого контуру можна знайти, встановивши  $s = j\omega$  у рівнянні (8), і її можна представити через  $w$  та  $\lambda$  наступним чином [19,20]

$$H(jw, \lambda) = G(jw)G_c(jw, \lambda)[1 + G(jw)G_c(jw, \lambda)]^{-1}. \quad (11)$$

Величина частотної характеристики визначається як амплітудний коефіцієнт замкнутого контуру  $AR$ , а його максимальна величина в діапазоні частот визначається як  $Mp$ .

Крива  $AR$  діагональних елементів повинна дорівнювати одиниці на якомога вищій частоті, щоб забезпечити відсутність зміщення та швидке наближення до нового стаціонарного стану, тоді як крива недіагональних елементів повинна бути якомога меншою [21].

Параметр  $Mp$  тісно пов'язаний зі стабільністю та продуктивністю замкнутої системи, і відповідну реакцію в часовій області можна вивести з його значення. Отже задачею процедури налаштування є визначення набору  $\lambda$ , що робить реакцію замкнутої системи достатньо швидкою та стабільною. Зазначеної мети в часовій області можна досягти, розв'язавши наступну задачу оптимізації в частотній області [19]

$$\min[\sum_i \sum_{j \neq i} Mp_{ij} + \sum_i Mp_{ij}], \quad (12)$$

$$Mp_{ij} \geq Mp_{low},$$

де  $Mp_{ij} = \max_w H_{ij}$ ;  $Mp_{ij}$  - функція  $\lambda$ ;  $Mp_{low}$  - нижня межа діагоналі  $Mp$ ;  $w$  - ваговий коефіцієнт для діагоналі  $Mp$ .

Оскільки задача оптимізації складається лише з одного вектора змінних, можна легко знайти оптимальне значення  $\lambda$  для мінімізації взаємодії та перерегулювання в циклах, поки всі  $Mr_{ij}$  відповідають обмеженням.

Результати налаштування ПИД контролерів триконтурної САК (рис. 2) процесом буріння свердловин із застосуванням наведеного алгоритму показано на рис. 6,7. Відповідні розрахунки виконувались у середовищі MATLAB®. На рис. 6 наведена реакція ПИД контролерів САК на стрибкоподібне збурення із застосуванням поширеного традиційного методу налаштування за найбільшим логарифмічним модулем (BLT) [3].

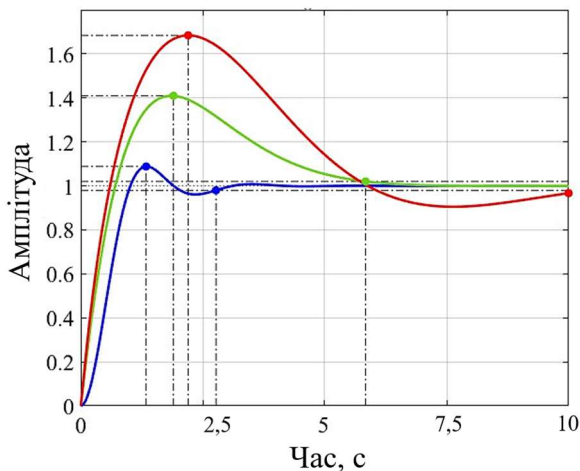


Рис. 6. Реакція ПИД контролерів триконтурної САК на стрибкоподібне збурення із застосуванням традиційного методу налаштування BLT

Відповідно до методу BLT налаштування Цильгера-Ніколса (Zielgler-Nichols) використовується для початкових налаштувань окремих контролерів, потім контролери розлаштовуються таким чином, щоб задовольнити критерій логарифмічного модуля.

На рис. 7 наведена реакція ПИД контролерів триконтурної САК на стрибкоподібне збурення із застосуванням дослідженого алгоритму [19].

Нижня межа діагоналі  $Mr$  обрана рівною 1,3. Мінімізація цільової функції, що відповідає рівнянню (12), робить реакцію системи стабільною, а обрані обмеження сприяють достатній її швидкості.

Таким чином, результати моделювання показують, що запропонований метод перевершує традиційні методи, такі як, наприклад, метод налаштування BLT [3] як за параметром часу перехідних процесів у замкнутих контурах, так і за величиною перерегулювання.

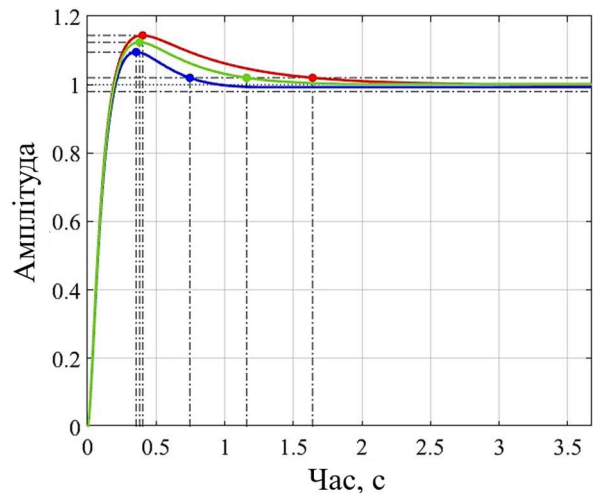


Рис. 7. Реакція ПИД контролерів триконтурної САК на стрибкоподібне збурення із застосуванням дослідженого частотного методу налаштування

**Висновки.** У досліджуваній ієрархічній системі автоматизованого керування процесом буріння свердловин на її нижньому рівні використана структура, що включає три контури на основі ПИД контролерів, які забезпечують регулювання швидкості обертання долота RPM, навантаження на долото WOB та параметрів системи очистки свердловини (перш за все, її продуктивності). Моделювання процесу буріння засвідчує тісний зв'язок між зазначеними параметрами, що потребує відповідного налаштування кожного контуру керування.

Більшість відомих методів налаштування багатоконтурних ПИД-контролерів схожі тим, що вони використовують правила налаштування одного контуру для отримання початкових значень для окремих контролерів, а потім розлаштовують окремі контури для збереження стабільності всієї системи. Промислова практика часто полягає в послідовному замиканні циклу з подальшим евристичним та консервативним розлаштуванням, що є складним і трудомістким процесом. В умовах реального виробничого процесу такий підхід на завжди дозволяє досягнути бажаних показників продуктивності та надійності керування.

Досліджено алгоритм налаштування багатоконтурних САК на основі ПИД контролерів, що реалізує узагальнений метод із внутрішньою моделлю ІМС. Застосовується критерій, що базується на визначенні параметрів частотної характеристики замкнутого контуру для досягнення бажаних показників продуктивності та надійності керування. Частотна характеристика замкнутого контуру

САК, отримується в результаті розрахунку вихідного сигналу системи у відповідь на синусоїдальний вхід.

Отримані результати свідчать про те, що налаштування триконтурної САК процесом буріння свердловин на основі ПД-регуляторів із застосуванням дослідженого методу дозволяють максимально точно досягнути бажаних показників продуктивності та надійності керування. Досліджений метод може бути використаний до динамічних моделей будь-якого порядку. При цьому характеристики зворотної реакції замкнутого контуру керування задаються заздалегідь. Крім того, в результаті виконання відповідного алгоритму отримується інформація про запаси стійкості та характеристики чутливості САК.

#### Література

1. Åström K.J., Hägglund T. Advanced PID Control. ISA, Research Triangle Park, NC, 2006.
2. João P.L. Coutinho, Lino O. Santos, Marco S. Reis. Bayesian Optimization for automatic tuning of digital multi-loop PID controllers. *Computers & Chemical Engineering*, Volume 173, May 2023, 108211. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2023.108211>
3. Luyben W.L. Simple method for tuning SISO controllers in multivariable systems. *Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev.*, 1986, 25 (3), pp. 654-660.
4. Hovd M., Skogestad S. Sequential design of decentralized controllers. *Automatica*, 1994, 30 (10), pp. 1601-1607.
5. Vu T.N.L., Lee M. Independent design of multi-loop PI/PID controllers for interacting multivariable processes. *J. Process Control*, 2010, 20 (8), pp. 922-33, 10.1016/j.jprocont.2010.06.012.
6. Shen S.-H., Yu C.-C. Use of relay-feedback test for automatic tuning of multivariable systems. *AIChE J.*, 1994, 40 (4), pp. 627-646. 10/1002/aic.690400408.
7. Halevi Y., Palmor Z., Efrati T. Automatic tuning of decentralized PID controllers for MIMO processes. *J. Process Control*, 1997, 7 (2), pp. 119-128, 10.1016/S0959-1524(97)82769-2.
8. Dittmar R., Gill S., Singh H., Darby M. Robust optimization-based multi-loop PID controller tuning: A new tool and its industrial application. *Control Eng. Pract.*, 2012, 20 (4), pp. 355-370. 1016/j.conengprac.2011.10.011.
9. Zhou, Z., Hu, Y., Liu, B., Dai, K., & Zhang, Y. Development of Automatic Electric Drive Drilling System for Core Drilling. *Applied Sciences*, 2023, 13(2), 1059. <https://doi.org/10.3390/app13021059>.
10. Galle E. M. and Woods H. B., Best Constant Weight and Rotary Speed for rotary Rock Bits, 1964, American Petroleum Institute.
11. Warren T. M. Drilling model for soft-formation bits. *Journal of Petroleum Technology*, 1981, 33, no. 6, <https://doi.org/10.2118/8438-PA>.
12. Andreas Nascimento, David Tamas Kutas, Asad Elmgerbi, Gerhard Thonhauser, Mauro Hugo Mathias. Mathematical Modeling Applied to Drilling Engineering: An Application of Bourgoyne and Young ROP Model to a Presalt Case Study. *Mathematical Problems in Engineering*, 2015, 631290, p.9 <https://doi.org/10.1155/2015/631290>.
13. Dong-Yup Lee, Moonyong Lee, Yongho Lee, Sunwon Park. Multiloop PID controllers tuning for desired closed loop responses. *IFAC Proceedings*, 2001, Volumes 34(25), 407-413. DOI:10.1016/S1474-6670(17)33858-2.
14. Rainer Dittmar. Model Predictive Control mit MATLAB und Simulink - Model Predictive Control with MATLAB and Simulink. Published 04 December 2019, 212 p. Doi10.5772/intechopen.86001. ISBN978-1-83880-096-3.
15. Arkadiy Turevskiy PID Cont. roller Design for a DC Motor, 2024. <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/26275-pid-controller-design-for-a-dc-motor>.
16. DC Motor Speed: PID Controller Design. <https://ctms.engin.umich.edu/CTMS/index.php?example=MotorSpeed&section=ControlPID>.
17. Harmse M, Dittmar R. Robuste Einstellung dezentraler PID-Regler in einer Mehrgrößenumgebung. 1st edition, *Automatisierungstechnische Praxis*, 2013; 51(12), pp. 68-78.
18. Lee Y, Lee M., Park S. and Brosilow C. PID controller tuning for desired closed loop responses for SISO systems. *AIChE Journal*, 1998, 44, 106-115.
19. Dong-Yup Lee, Moonyong Lee, Yongho Lee, Sunwon Park. Multiloop PID controllers tuning for desired closed loop responses. *IFAC Proceedings*, 2001, Volumes 34(25), pp. 407-413. DOI:10.1016/S1474-6670(17)33858-2.
20. Lee Y, Park S. and Lee M. PID controller tuning to obtain desired closed loop responses for cascade control systems. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 1998, 37, 1859-1865.
21. Edgar T. E, Heeb R. and Hougen I. O. Computer-aided process control system design using interactive graphics. *Computers Chem. Eng.*, 1981, 5, pp. 225-232.

**Morkun V.S., Morkun N.V., Bobrov E.Y., Hryshchenko Y.O. Modeling of a multi-circuit system for automated control of the well drilling process based on subcontrollers**

Decentralized automated control systems (ACS) based on proportional-integral-differential (PID) controllers remain the most common solution for controlling industrial processes with multiple inputs and outputs (MIMO). This is due to their flexibility, simplicity, and inherent fault tolerance compared to centralized control structures. Even when more sophisticated strategies, such as model predictive control (MPC), are applied, PID controllers are usually used at lower control levels of the respective systems. The paper considers an automated control system for the well drilling process implemented on the basis of an electric drive. In the studied hierarchical ACS, a structure is used at its lower level that includes three circuits based on proportional-integral-differential (PID) controllers that provide control of the bit rotation speed RPM, the bit load WOB, and the parameters of the well cleaning system (primarily its performance). Drilling process modeling shows a close relationship between these parameters, which requires appropriate adjustment of each control loop. The optimal tuning of decentralized PID controllers in multi-loop ACS remains a difficult and complex task. Most of the known methods of tuning multi-loop PID controllers are similar in that they use the tuning rules of one loop to obtain initial values for individual controllers, and then detune the individual loops to maintain the stability of the entire system. In the conditions of a real production process, this approach does not always allow achieving the desired performance and control reliability. An algorithm for tuning multicircuit SACs based on PID controllers, which

implements the generalized internal model method (IMC), is investigated. A criterion based on determining the parameters of the closed-loop frequency response is used to achieve the desired performance and control reliability. The frequency response of the closed-loop ACS is obtained by calculating the system output signal in response to a sinusoidal input. The results obtained indicate that the tuning of a three-circuit ACS based on PID controllers using the investigated method allows achieving the most accurate compliance with the desired performance and control reliability. The investigated method can be applied to dynamic models of any order. In this case, the feedback characteristics of the closed-loop control are set in advance. In addition, as a result of the corresponding algorithm, information is provided on the stability margins and sensitivity characteristics of the ACS.

**Keywords:** drilling, modeling, automated control, multi-loop system, controller.

**Моркун Володимир Станіславович** – д-р техн. наук, проф., професор Криворізького національного університету (Кривий Ріг), morkunv@gmail.com.

**Моркун Наталя Володимирівна** – д-р техн. наук, проф., професор Львівського національного університету імені Івана Франка (Львів), nmorkun@gmail.com.

**Бобров Євген Юрійович** – аспірант, Криворізького національного університету (Кривий Ріг), smgrischenko@gmail.com.

**Грищенко Ярослав Олександрович** – аспірант Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля (Київ), grischenckokgtl@gmail.com.

Стаття подана 15.05.2025.

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-291-5-53-58>

УДК 681.322

## ВПЛИВ ПАРАМЕТРА SPREAD РАДІАЛЬНО-БАЗИСНИХ МЕРЕЖ НА АПРОКСИМАЦІЮ ОСНОВНИХ КАНАЛІВ КЕРУВАННЯ РЕАКТОРУ СИНТЕЗУ ОЦТОВОЇ КИСЛОТИ

Поркуян О.В., Самойлова Ж.Г.

## INFLUENCE OF THE SPREAD PARAMETER OF RADIAL-BASE NETWORKS ON THE APPROXIMATION OF THE MAIN CONTROL CHANNELS OF AN ACETIC ACID SYNTHESIS REACTOR

Porkuian O.V., Samojlova Zh.G.

Основу хімічної промисловості становлять хімічні реактори. У нинішньому конкурентному сценарії першочергове значення має підтримка різних робочих змінних та відповідність специфікаціям продукту. Безперервний реактор з мішалкою (CSTR) широко використовується в багатьох хімічних, фармацевтичних та нафтових галузях промисловості, а також в галузі охорони навколишнього середовища та керування відходами. Моделі нейронних мереж пропонують найбільш уніфікований підхід до побудови справді інтелектуальних систем, які можуть забезпечити оптимальне керування для багатьох систем. За останнє десятиріччя штучні нейронні мережі (ІНС) набули значення як універсальні структури, керовані даними, для моделювання нелінійних стаціонарних станів, а також динамічних процесів.

Для побудови та дослідження властивостей нейронної мережі використовувалися статистичні дані реактора синтезу оцтової кислоти, який працює у стаціонарному режимі. Для моделювання використовувалося середовище програмного симулятора MATLAB 2021b.

Метою даної роботи було побудова і дослідження властивостей радіально – базисних нейронних мереж RBF і GRNN, за основними каналами керування реактором синтезу оцтової кислоти, який є газорідним реактором з безперервним перемішуванням. Досліджену мережу можна запропонувати використовувати для керування реактором.

У роботі було досліджено вплив параметра SPREAD на структуру радіальної базисної мережі та якість апроксимації. Для моделювання радіально – базисних мереж RBF і GRNN для керування реактором синтезу оцтової кислоти по кожному каналу

керування використовувалася ітераційна процедура формування мереж. Для кількісної оцінки якості апроксимації вихідних параметрів було використано відносну похибку. Параметр впливу SPREAD для радіально – базисної мережі RBF було визначено рівним 0,01, 0,1, 0,7, 2,0, 5,0, 10,0, 20,0, 50,0, 100,0. Для радіально – базисної мережі GRNN було прийнято значення параметра впливу SPREAD 0,7, 2,5,10,20,50,100. Моделювання радіально – базисних мереж RBF і GRNN для керування реактором синтезу оцтової кислоти по кожному каналу керування за допомогою ітераційної процедури формування мереж в MATLAB 2021b показало задовільну якість апроксимації вихідних даних.

Також можна казати, що радіально – базисні мережі RBF і GRNN можна використовувати для поліпшення керування реактором синтезу оцтової кислоти за всіма основними каналами керування.

**Ключові слова:** радіально-базисна нейронна мережа, реактор, апроксимація, параметр впливу

Основу хімічної промисловості становлять хімічні реактори [1,2]. У нинішньому конкурентному сценарії першочергове значення має підтримка різних робочих змінних та відповідність специфікаціям продукту [3,4]. Безперервний реактор з мішалкою (CSTR) широко використовується в багатьох хімічних, фармацевтичних та нафтових галузях промисловості, а також в галузі охорони навколишнього середовища та керування відходами [5,6,7,8,9,10]. Моделі нейронних мереж пропонують найбільш уніфікований

підхід до побудови справді інтелектуальних систем, які можуть забезпечити оптимальне керування для багатьох систем [11]. За останнє десятиліття штучні нейронні мережі (ІНС) набули значення як універсальні структури, керовані даними, для моделювання нелінійних стаціонарних станів, а також динамічних процесів [12,13]. У цій роботі було запропоновано використовувати радіально-базисні нейронні мережі для вирішення проблеми керування реактором синтезу оцтової кислоти, який є газорідним реактором з безперервним перемішуванням.

Для побудови та дослідження властивостей нейронної мережі використовувалися статистичні дані реактора синтезу оцтової кислоти, який працює у стаціонарному режимі. Для моделювання використовувалося середовище програмного симулятора MATLAB 2021b. Ця програма рекомендована для моделювання різних нейронних мереж із різною кількістю нейронів.

Структурно-логічна схема реактора синтезу оцтової кислоти була досліджена в роботі [14] і показана на рисунку 1.

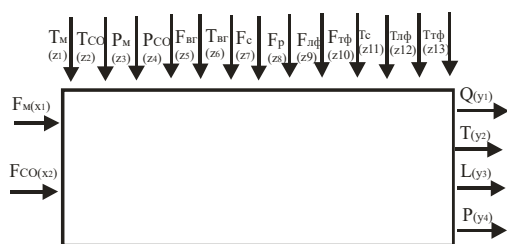


Рис. 1. Структурна схема реактору

Вихідними координатами реактору синтезу як об'єкту керування є:

- тиск в реакторі  $P$ ;
- рівень в реакторі  $L$ ;
- температура реакції синтезу  $T$ ;
- концентрація оцтової кислоти в реакційній рідині  $Q$ .

Вхідними координатами реактору синтезу як об'єкту керування є:

- витрата метанолу  $F_M$ ;
  - витрата оксиду вуглецю  $F_{CO}$ .
- До збурюючих координат слід віднести:
- температуру метанолу  $T_M$ ;
  - температуру оксиду вуглецю  $T_{CO}$ ;
  - тиск метанолу  $P_M$ ;
  - тиск оксиду вуглецю  $P_{CO}$ ;
  - витрату віддувальних газів  $F_{VF}$ ;
  - температуру віддувальних газів  $T_{VF}$ ;
  - витрату реакційної рідини на виході з сепаратора  $F_C$ ;

- витрату реакційної рідини на виході з реактора  $F_P$ ;

- витрату *витрата потоку* легкої фази конденсату після декантатора колони відгонки легких фракцій  $F_{LF}$ ;

- витрату *витрата потоку* важкої фази конденсату після декантатора колони відгонки легких фракцій  $F_{TF}$ ;

- температуру кубової рідини  $T_C$  на вході в реактор з сепаратора;

- *температура потоку* легкої фази конденсату після декантатора колони відгонки легких фракцій  $T_{LF}$ ;

- *температура потоку* важкої фази конденсату після декантатора колони відгонки легких фракцій  $T_{TF}$ .

**Метою** даної роботи було побудова і дослідження властивостей радіально – базисних нейронних мереж RBF і GRNN, за основними каналами керування реактором синтезу оцтової кислоти. В роботі досліджувався вплив параметру SPREAD нейронної мережі на апроксимацію вихідних даних реактора синтезу оцтової кислоти. Досліджену мережу можна запропонувати використовувати для керування реактором.

**Викладання основного матеріалу.** Для моделювання радіально – базисних мереж RBF і GRNN для керування реактором синтезу оцтової кислоти по кожному каналу керування використовувалася ітераційна процедура формування мереж.

Для кількісної оцінки якості апроксимації вихідних параметрів було використано відносну похибку.

$$\delta_{\text{відн}} = \frac{a_{\text{вимір}} - a_{\text{нейрмер}}}{a_{\text{вимір}}} \quad (1)$$

де  $a_{\text{вимір}}$  – вихідні дані, отримані на підприємстві,  $a_{\text{нейрмер}}$  – результати моделювання за допомогою нейромережі

Радіально – базисна нейронна мережа RBF, яка додає по одному нейрону на кожному кроці була створена за допомогою функції newtrb. Нейрони додаються до прихованого шару до тих пір, поки сума квадратів помилок не стане меншою від заданого значення або не буде використано максимальну кількість нейронів. Ця функція викликається за допомогою команди:

$$\text{net} = \text{newtrb}(P, T, \text{GOAL}, \text{SPREAD})$$

Було також побудовано функціональну схему нейронної мережі в системі Simulink (рис. 2).

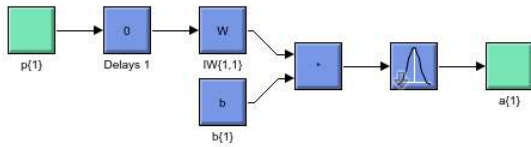


Рис. 2. Функціональна схема радіально – базисної нейронної мережі, побудованої в системі Simulink

Входами функції newrb є масиви вхідних  $P$  і цільових векторів  $T$ , і навіть параметри GOAL (допустима середньоквадратична помилка мережі), SPREAD (параметр впливу), а виходом – опис радіальної базисної мережі. Значення параметра SPREAD має бути достатньо великим, щоб покрити весь діапазон значень входів, але не настільки, щоб ці значення були однаково значущими.

Було сформовано навчальну множину вхідних  $P$  та вихідних параметрів  $T$ , а також новий вектор  $[P1;T1]$ . Новий вектор формується для перевірки побудови нейронної мережі. Було також встановлено допустиме значення

функціоналу помилки, що дорівнює 0,02. Параметр впливу SPREAD для радіально – базисної мережі RBF було визначено рівним 0,01, 0,1, 0,7, 2,0, 5,0, 10,0, 20,0, 50,0, 100,0.

Кількість нейронів, що використовуються в прихованому шарі в даному випадку дорівнює двадцяти трьом, що відповідає значенню функціоналу помилки 0,02. При невеликій кількості нейронів прихованого шару радіально – базова мережа досить добре апроксимує нелінійну залежність, задану навчальною множиною з 23 елементів. Результати моделювання радіально – базової мережі представлені у таблиці 1.

В результаті навчання функція newrb створює радіальну базову мережу на множині, що навчається. Єдина умова, яку потрібно виконати, полягає в тому, щоб значення параметра SPREAD було досить великим. У цьому випадку активні області базових функцій перекриваються та покривають весь діапазон вхідних значень. Це забезпечує необхідну гладкість апроксимуючих кривих та перешкоджає виникненню явища перенавчання. Однак значення SPREAD не повинно бути настільки великим, щоб радіальна базова функція оголошувала однаково значущими значення входу.

Таблиця 1

**Відносна похибка апроксимації вихідних параметрів для кожного керуючого каналу за допомогою радіально-базисної мережі RBF**

Spread канал	0,01	0,1	0,7	2,0	5,0	10,0	20	50	100
витрата оксиду вуглецю-температура	0,0017	0,0017	0,0026	0,0020	0,0029	0,0055	0,0450	61,05	834,41
витрата метанолу-температура	0,0022	0,0022	0,0022	0,0022	0,0017	0,0017	0,0018	0,0054	2,8618
витрата оксиду вуглецю-тиск	$3.07 \times 10^{-4}$	$3.07 \times 10^{-4}$	$3.07 \times 10^{-4}$	$3.07 \times 10^{-4}$	$3.07 \times 10^{-4}$	$3.07 \times 10^{-4}$	$3.07 \times 10^{-4}$	$3.07 \times 10^{-4}$	$3.07 \times 10^{-4}$
витрата оксиду вуглецю-рівень	0,0057	0,0057	0,0149	0,0060	0,0101	0,0231	0,0697	367,56	3597
витрата метанолу-рівень	0,0080	0,0080	0,0080	0,0080	0,0057	0,0057	0,0064	0,0180	7,667
витрата оксиду вуглецю-концентрація кислоти	0,0091	0,0091	0,0090	0,0081	0,0081	0,0074	0,0099	0,0102	0,0076
витрата метанолу-концентрація кислоти	0,0090	0,0090	0,0090	0,0090	0,0090	0,0090	0,0093	0,0091	0,0100

Таблиця 2

Відносна похибка апроксимації за допомогою радіально-базисної мережі GRNN

Spread \ канал	0,7	2	5	10	20	50	100
витрата оксиду вуглецю-температура	0,0027	0,0027	0,0026	0,0024	0,0021	0,0020	0,0020
витрата метанолу-температура	0,0020	0,0020	0,0020	0,0020	0,0019	0,0020	0,0019
витрата оксиду вуглецю-тиск	$3.07 \times 10^{-4}$	$3.07 \times 10^{-4}$	$3.07 \times 10^{-4}$	$3.07 \times 10^{-4}$	$3.07 \times 10^{-4}$	$3.07 \times 10^{-4}$	$3.07 \times 10^{-4}$
витрата оксиду вуглецю-рівень	0,0085	0,0085	0,0086	0,0089	0,0086	0,0085	0,0087
витрата метанолу-рівень	0,0070	0,0070	0,0070	0,0070	0,0073	0,0082	0,0082
витрата оксиду вуглецю-концентрація кислоти	0,0071	0,0071	0,0071	0,0066	0,0069	0,0075	0,0088
витрата метанолу-концентрація кислоти	0,0105	0,0105	0,0105	0,0104	0,0102	0,0091	0,0096

Нейронні мережі GRNN (Generalized Regression Neural Network) призначені для вирішення завдань узагальненої регресії, аналізу часових рядів та апроксимації функцій. Характерною особливістю цих мереж є дуже висока швидкість навчання.

Функціональна схема радіально – базисної нейронної мережі GRNN, побудованої в системі Simulink показано на рисунку 3.

Вона аналогічна функціональній схемі радіально – базисної нейронної мережі, побудованої в системі Simulink, але відрізняється структурою другого шару, в якому використовується блок `normprod` для обчислення нормованого скалярного добутка рядка масиву ваг та вектора входу.

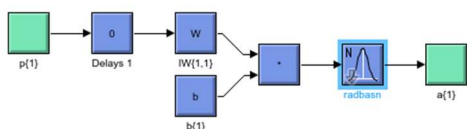


Рис. 3. Функціональна схема радіально – базисної нейронної мережі GRNN, побудованої в системі Simulink

Перший шар - це радіальний базисний шар з числом нейронів, рівним числу елементів  $Q$  навчальної множини. Як початкове наближення

для матриці ваг вибирається масив  $P1$ ; зсув встановлюється рівним вектор-стовпцю з елементами:  $0,8326/SPREAD$ .

Для створення нейронної мережі GRNN призначено функцію `newgrnn`. В ході побудови мережі GRNN було зроблено навчальну множину векторів входу  $P$  та цілей  $T$ . Перший шар у мережах GRNN нічим не відрізняється від першого шару в радіальних мережах.

Прийmemo значення параметра впливу  $SPREAD$  0,7, 2,5,10,20,50,100 (табл.2).

Сформована мережа GRNN використовує 23 нейрони у прихованому шарі і дуже успішно вирішує задачу апроксимації.

Якщо параметр впливу  $SPREAD$  встановлено рівним 0,01, то це означає, що діапазон перекриття вхідних значень становить лише  $\pm 0,01$ . Аналогічно можна визначити діапазон перекриття вхідних значень для інших значень параметру  $SPREAD$ . В цьому випадку не забезпечується необхідної гладкості апроксимованої функції.

Якщо параметр впливу  $SPREAD$  малий, то радіальна базова функція характеризується різким спадом і діапазон вхідних значень, на який реагують нейрони прихованого шару, виявляється дуже малим. Зі збільшенням параметра  $SPREAD$  нахил радіальної базисної функції стає гладкішим, і в цьому випадку вже кілька нейронів реагують на значення вектора входу. Тоді на виході мережі формується вектор, що відповідає середньому кількох цільових

векторів, відповідних вхідним векторам навчальної множини, близьких до вектора входу.

Чим більше значення параметра SPREAD, тим більше нейронів бере участь у формуванні середнього значення, і в результаті функція, що генерується мережею, стає більш гладкою.

Якщо параметр впливу SPREAD вибирається досить великим, то у цьому випадку всі функції активації перекриваються і кожен базовий нейрон видає значення близьке до 1 для всіх значень входів. Це призводить до того, що мережа не реагує на вхідні значення. Функція `newtb` намагатиметься будувати мережу, але не зможе забезпечити необхідної точності через обчислювальні проблеми. У процесі обчислень виникають труднощі зі зверненням матриць, і це видаються попередження, а точність апроксимації виявляється неприпустимо низькою.

Якщо розглядати якість апроксимації вихідних значень радіально- базисною нейронною мережею для каналів витрата оксиду вуглецю-тиск, витрата оксиду вуглецю-концентрація кислоти, витрата метанолу-концентрація кислоти, то при всіх досліджуваних значеннях параметра SPREAD було досягнуто задовільного значення відносної похибки. Для каналів витрата оксиду вуглецю-температура, витрата оксиду вуглецю-рівень при значеннях параметра SPREAD 0,01, 0,1, 0,7, 2,0, 5,0, 10,0, 20,0 було досягнуто задовільного значення відносної похибки. Для інших значень параметра SPREAD 50,0 і 100,0 якість апроксимації виявилася незадовільною. Для каналів витрата метанолу-температура, витрата метанолу-рівень при значеннях параметра SPREAD 0,01, 0,1, 0,7, 2,0, 5,0, 10,0, 20,0, 50,0 було досягнуто задовільного значення відносної похибки. Для інших значень параметра SPREAD 100,0 якість апроксимації виявилася незадовільною.

Якщо розглядати якість апроксимації вихідних значень радіально- базисною нейронною мережею GRNN для всіх каналів при всіх досліджуваних значеннях параметра SPREAD було досягнуто задовільного значення відносної похибки.

**Висновки:** Моделювання радіально – базисних мереж RBF і GRNN для керування реактором синтезу оцтової кислоти по кожному каналу керування за допомогою ітераційної процедури формування мереж в MATLAB 2021b показало задовільну якість апроксимації вихідних даних.

Якщо порівнювати мережі з прямою передачею сигналу і радіальні базисні мережі, слід зазначити, що за вирішення тих самих завдань одна з мереж має перевагу перед інший. Проектування радіальної базисної мережі вимагає значно менше часу, а при обмеженій точності навчання може вимагати і меншої кількості нейронів, що використовуються. Перевага в тому, що швидкість навчання дуже висока, оскільки навчання зводиться лише до присвоєння значень ваг. Виконане дослідження показало, що параметр впливу SPREAD слід вибирати більшим, ніж крок розбиття інтервалу завдання навчальної послідовності, але меншим за розмір інтервалу.

Також можна казати, що радіально – базисні мережі RBF і GRNN можна використовувати для поліпшення керування реактором синтезу оцтової кислоти за всіма основними каналами керування.

#### Л і т е р а т у р а

1. Kamesh R. Adaptive ANN Model based Nonlinear Control of a Semi-batch Polymerization Reactor Challenge Problem/ R. Kamesh, K. Y. Rani - 2016 Indian Control Conference (ICC), Indian Institute of Technology Hyderabad, January 4-6, 2016. Hyderabad, India, p.222-229, DOI: [10.1109/INDIANCC.2016.7441132](https://doi.org/10.1109/INDIANCC.2016.7441132)
2. Pozna C. An approach to the design of nonlinear statespace control systems / C. Pozna, R. E., 2018, Precup Stud. Inform. Control, vol. 27, no. 1, pp. 5–14, [doi.org/10.24846/v27i1y201801](https://doi.org/10.24846/v27i1y201801)
3. Dirion, J.L. Elaboration of a Neural Network System for Semi-batch Reactor Temperature Control: an Experimental Study/ J.L.Dirion, B. Ettegui, M.Cabassudm, M.V. Le Lann, & G. Casamatta, 1996, Chemical Engineering and Processing, Vol. 35, pp. 225-234. [https://doi.org/10.1016/0255-2701\(95\)04120-6](https://doi.org/10.1016/0255-2701(95)04120-6)
4. Galván I.M. The use of neural networks for fitting complex kinetic data/ I.M. Galván<sup>a</sup>, J.M. Zaldívar<sup>a</sup>, H. Hernández<sup>b</sup>, E. Molga, Computers & Chemical Engineering, Volume 20, Issue 12, 1996, Pages 1451-1465, [https://doi.org/10.1016/0098-1354\(95\)00231-6](https://doi.org/10.1016/0098-1354(95)00231-6)
5. Gao D. X. Optimal dynamic control for CSTR nonlinear system based on feedback linearization/ D. X. Gao and H. Liu, in Proc. IEEE Conf. Chin. Control Decis. (CCDC), May 2015, pp. 1298–1302., DOI: [10.1109/CCDC.2015.7162119](https://doi.org/10.1109/CCDC.2015.7162119)
6. Vasičkaninova A. Neural Network Predictive Control of a Chemical Reactor »/ A. Vasičkaninova, M. Bakošova, Acta Chimica Slovaca, Vol.2, No.2, 2009, 21 - 36 DOI: [10.1109/87.668039](https://doi.org/10.1109/87.668039)
7. Akpan, A. V. Nonlinear Model Identification and Adaptive Model Predictive Control Using Neural

- Networks/ A. V.Akpan, G. D.Hassapis, 2011, ISA Transactions Vol. 50, pp.177–194 doi: 10.1016/j.isatra.2010.12.007.
8. Dong-Juan L. Adaptive neural network control for continuous stirred tank reactor process/ L. Dong-Juan, 2013, IFAC Proc. Volumes, vol. 46, no. 20, pp. 171–175, Jan. doi.org/10.3182/20130902-3-CN-3020.00148
  9. Nassira Z. Adaptive neural-network output feedback control design for uncertain CSTR system with input saturation/ Z. Nassira, C. Mohamed, N. Essounbouli, Oct. 2018, in Proc. Int. Conf. Elect. Sci. Tech. Maghreb (CISTEM), pp. 1–6., DOI: [10.1109/CISTEM.2018.8613330](https://doi.org/10.1109/CISTEM.2018.8613330)
  10. Alshammari O. A Neural Network-Based Adaptive Backstepping Control Law With Covariance Resetting for Asymptotic Output Tracking of a CSTR Plant/ O. Alshammari, M. N. Mahyuddin and H. Jerbi, 2020, in IEEE Access, vol. 8, pp. 29755-29766, , doi: 10.1109/ACCESS.2020.2972621.
  11. Krenker A. Introduction to the Artificial Neural Networks / Andrej Krenker, Janez Bešter and Andrej Kos, 2011, [Internet]. InTech; Available from: <http://dx.doi.org/10.5772/644>
  12. Beyhan S. Stable modeling based control methods using a new RBF network / S. Beyhan, M. Alci, - 2010, ISA Trans., Oct;49(4):510-8. doi: 10.1016/j.isatra.2010.04.005. Epub 2010 May 14. PMID: 20471011.
  13. Akpan V. A. Nonlinear model identification and adaptive model predictive control using neural networks/ Vincent A. Akpan, George D. Hassapis, - 2011, April, ISA Transactions, Volume 50, Issue 2, Pages 177-194
  14. Samoiloza Zh.G. Development of a mathematical model of technological processes in a reactor for the synthesis of otic acid / Zh.G. Samoiloza // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 5/2 (113 ), 2021, pp. 94-104, DOI: 10.15587/1729-4061.2021.242816

**Porkuian O.V., Samoiloza Zh.G. Influence of the SPREAD parameter of radial-base networks on the approximation of the main control channels of an acetic acid synthesis reactor**

*The chemical industry is based on chemical reactors. In today's competitive scenario, it is paramount to support the various operating variables and meet product specifications. The continuous stirred tank reactor (CSTR) is widely used in many chemical, pharmaceutical and petroleum industries, as well as in environmental protection and waste management. Neural network models offer the most unified approach to*

*building truly intelligent systems that can provide optimal control for many systems.*

*Over the past decade, artificial neural networks (ANNs) have gained importance as versatile data-driven structures for modelling nonlinear steady-state and dynamic processes.*

*To build and study the properties of the neural network, we used statistical data from an acetic acid synthesis reactor operating in a stationary mode. The MATLAB 2021b software simulator environment was used for modelling.*

*The aim of this work was to build and study the properties of radial basis neural networks RBF and GRNN, according to the main control channels of the acetic acid synthesis reactor, which is a gas-liquid reactor with continuous stirring. The investigated network can be proposed to be used for reactor control.*

*In this paper, we investigated the effect of the SPREAD parameter on the structure of the radial basis network and the quality of approximation. To model the radial basis networks RBF and GRNN for controlling an acetic acid synthesis reactor for each control channel, an iterative procedure for forming networks was used.*

*The relative error was used to quantify the quality of the approximation of the initial parameters. The SPREAD influence parameter for the radial basis function (RBF) network was determined to be 0.01, 0.1, 0.7, 2.0, 5.0, 10.0, 20.0, 50.0, 100.0. For the radial basis network GRNN, the values of the influence parameter SPREAD were taken to be 0.7, 2.5, 10, 20, 50, 100. The modelling of the radial basis networks RBF and GRNN for controlling the acetic acid synthesis reactor for each control channel using the iterative procedure for forming networks in MATLAB 2021b showed a satisfactory quality of approximation of the original data.*

*It can also be said that the radial basis networks RBF and GRNN can be used to improve the control of the acetic acid synthesis reactor by all the main control channels.*

**Keywords:** radial basis neural network, reactor, approximation, influence parameter

**Поркуян Ольга Вікторівна** – доктор технічних наук, професор, ректор Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля ( м.Київ) [porkuian@snu.edu.ua](mailto:porkuian@snu.edu.ua)

**Самойлова Жанна Георгіївна** – кандидат технічних наук, доцент кафедри Комп'ютерно-інтегрованих систем управління Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля ( м.Київ) [samojlova@snu.edu.ua](mailto:samojlova@snu.edu.ua)

Стаття подана 17.03.2025.

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-291-5-59-63>

UDC 678.743

## STUDY OF THE INFLUENCE OF LASER RADIATION ADSORBERS ON THE ABLATION OF CARBON FIBER-REINFORCED PLASTIC BY FEMTOSECOND LASER PULSES

Baklan D.V., Myronyuk O.M., Bilousova A.O., Vanagas E.

## ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ АДСОРБЕРІВ ЛАЗЕРНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ НА АБЛЯЦІЮ ФЕМТОСЕКУНДНИМИ ЛАЗЕРНИМИ ІМПУЛЬСАМИ АРМОВАНОВОГО ВУГЛЕЦЕВИМ ВОЛОКНОМ ПЛАСТИКУ

Баклан Д.В., Миронюк О.В., Білоусова А.О., Ванас Е.

Carbon fiber-reinforced plastics (CFRPs) have gained popularity due to their advantageous properties, including a high strength-to-weight ratio, resistance to chemicals, and design flexibility. However, the processing of these composite materials remains challenging due to the heterogeneity between carbon fibers and the polymer matrix. Laser ablation, particularly with ultrafast femtosecond lasers, has emerged as a promising technique for the precise machining of CFRPs. Advantages of this technique include minimal thermal damage and improved ablation precision. However, disparities in ablation rates between the epoxy matrix and carbon fibers frequently impede process efficiency. The present study investigates the use of hydroxyapatite-based additives to enhance laser-material interaction and optimize the ablation behavior of CFRP systems. Specifically, copper-substituted hydroxyapatite (Cu-HAp) microparticles, which are known for their strong absorption in the near-infrared (NIR) region around 1030 nm, were synthesized and introduced into the epoxy matrix. Calcium hydroxyapatite (Ca-HAp), a thermally stable and biocompatible ceramic with low NIR absorption, was utilized as a reference to assess the specific contribution of copper ions. Epoxy composites with 5 wt.% of various filler compositions (100% Cu-HAp, 75% Cu-HAp/25% Ca-HAp, and 50% Cu-HAp/50% Ca-HAp) were prepared and incorporated into CFRP laminates. Femtosecond laser ablation at 1030 nm was performed under optimized conditions for each sample type, followed by evaluation of the resulting surface morphology using optical profilometry and SEM. The findings indicated that the incorporation of Cu-HAp fillers promoted enhanced energy absorption, thereby

facilitating more efficient ablation with reduced thermal damage in comparison to unmodified epoxy and Ca-HAp-filled systems. Replacing Cu-HAp with Ca-HAp increased the required laser fluence and energy input. This indicates that copper ions enhance localized heating and energy coupling. SEM imaging showed that Cu-HAp particles had a porous, aggregated morphology that redistributed thermal energy, while Ca-HAp had denser, more homogenous filler structures with reduced porosity. This work shows the potential of Cu-HAp as a functional additive to adjust how femtosecond laser radiation interacts with composite materials and improve micromachining outcomes. The findings support the feasibility of using NIR-absorbing ceramic fillers to deal with common issues associated with laser processing of CFRPs, including heat-affected zones and ablation inhomogeneity.

**Ключові слова:** CFRP; carbon fiber; laser processing; femtosecond laser; cutting; ablation.

**Introduction.** Carbon fiber reinforced plastics (CFRPs) have properties that make them ideal for use in aerospace, automotive, and marine applications. These properties include lightness, strength, ease of formation, ease of scaling, and resistance to aggressive environments. However, processing such materials is challenging due to the heterogeneous phases (fiber and polymer), which require more operations [1]. One promising processing method is laser processing. For CFRP, however, laser processing is associated with several problems, particularly the formation of heat-

affected zones (HAZs), which can negatively impact structural integrity [2].

This method uses continuous or pulsed laser exposure. However, this approach is energy-intensive and often results in significant thermal damage at the cut edge, particularly with conventional nanosecond or picosecond pulses [3]. Using ultrafast (femtosecond) laser pulses has several advantages, including minimal thermal diffusion, higher precision, and reduced HAZ due to ultra-short interaction times and nonlinear absorption processes [4, 5]. Another advantage of femtosecond laser processing is equalizing the ablation rate of the polymer part (epoxy matrix) and the reinforcing fibers (carbon fiber) in the composite material. In conventional laser cutting, epoxy degrades faster than carbon fiber under laser irradiation, resulting in uneven and inefficient ablation [6].

One strategy to address this imbalance involves modifying the polymer matrix with additives that increase its absorption in the laser wavelength range and improve the resin's thermal resistance. Using adsorbing fillers that enhance interaction with the laser beam and redistribute thermal energy locally can be an effective solution [7].

Recently, copper-substituted hydroxyapatites have attracted attention due to their strong absorption in the near-infrared (NIR) region, particularly at around 1030 nm wavelengths [8]. Their hierarchical structure and surface morphology suggest potential applications in enhanced heat dissipation and localized energy management. In this context, copper hydroxyapatite (Cu-HAp) microparticles were selected as functional additives. In addition to Cu-HAp, this study utilizes calcium hydroxyapatite (Ca-HAp) as a reference material. Ca-HAp is a well-known, thermally stable, biocompatible ceramic with limited absorption in the NIR region [9]. Including it allows for a comparative analysis that isolates the specific contribution of copper ions to laser absorption efficiency and ablation behavior. Ca-HAp was also chosen because of its structural similarity to Cu-HAp and its widespread use in materials science as a baseline material in studies of substitution effects [10, 11].

**Task setting.** The present work is aimed at investigating the influence of hydroxyapatite-based fillers on the efficiency and precision of femtosecond laser ablation of CFRP systems. The study includes: the synthesis and morphological characterization of copper hydroxyapatite (Cu-HAp) and calcium hydroxyapatite (Ca-HAp)

microparticles; preparation of modified epoxy resins and CFRP systems incorporating these additives; laser ablation of the modified systems using a femtosecond laser with a wavelength of 1030 nm; comparative analysis of the ablation quality, morphology, and uniformity for the reference and modified systems.

**The aim of the work is to** evaluate the potential of hydroxyapatite-based additives, particularly Cu-HAp, as effective NIR absorbers for enhancing the femtosecond laser ablation of CFRP materials. A comparative analysis with Ca-HAp is conducted to determine the role of copper substitution in modulating laser-matter interaction, minimizing heat-affected zones, and improving ablation precision and uniformity.

**Presentation of the main research material.**

The required amounts of copper nitrate and ammonium dihydrogen phosphate in a 2:1 ratio were dissolved in water to form a 0.2 M solution. The pH was increased to 7 with ammonia solution. The solution was left to stir at room temperature for 16 hours. After that, it was filtered, washed with distilled water, and centrifugated at 20,000 rpm. The powder was then dried in an oven at 80 °C for 3 hours. The copper hydroxyapatite powder was additionally calcined in an oven at 400 °C for 1 hour. To prepare calcium hydroxyapatite powders, the required amount of calcium nitrate was substituted for copper nitrate and synthesized. As a result, 3 samples of adsorbers were obtained: 1) 100%Cu-HAp, 2) 75%Cu-HAp + 25%Ca-HAp, 3) 50%Cu-HAp + 50%Ca-HAp.

To evaluate the effect of the obtained hydroxyapatite fillers on laser ablation, epoxy composites were prepared by dispersing the synthesized Ca-HAp and Cu-HAp particles in epoxy resin (CHS-Epoxy 520, Spolchemie). The filler loading was set at 5 wt. % for both types of particles. The fillers were dispersed in the epoxy resin for a duration of 30 minutes by means of a high-speed disperser (WiseTis HG 15A). Subsequently, the hardener was incorporated in accordance with a stoichiometric ratio (TELALIT 0600, Spolchemie), and the mixture was manually agitated. Following this, the mixture was subjected to homogenization and degassing under vacuum. The resulting composition was subsequently poured into molds to form plates with a thickness of approximately 2 mm. The plates were then cured at room temperature for a period of 24 hours, followed by a curing process at 50 °C for 3 hours. The modification of CFRP entailed a procedure analogous to the one employed to prepare a thin layer between the carbon fiber layers (3K twill, 220

g/m<sup>2</sup>). The modified epoxy compositions (with 5 wt. % filler) were applied between the CFRP sheets and cured under the same conditions to obtain samples with the fillers incorporated into the matrix.

The laser ablation procedure was executed using a femtosecond laser system (Fig. 1), which operates at a wavelength of 1030 nm, achieves a maximum output power of 6 watts, and can generate up to 200 kHz of repetition rate. The beam exhibited a Gaussian profile, with a diameter of 4,1 mm (at an intensity level of 1/e<sup>2</sup>), and was formed using a half-wave plate (HWP), a polarizer (Pol), and a quarter-wave plate (QWP) for circular polarization. The focusing process utilized a 10x Mitutoyo Plan Apo NIR objective, yielding a focal spot of approximately 3,9 μm (1/e<sup>2</sup>). The samples were mounted on a high-precision XY table (Aerotech ANT130-XY). The laser scanning procedure was conducted over an area measuring 0,5×0,5 mm, with a scanning step size of 2,5 micrometers. To ascertain the most efficacious overlap values, a series of trials were conducted. After processing, the samples were rinsed with distilled water in an ultrasonic bath to remove any extraneous particulate matter.

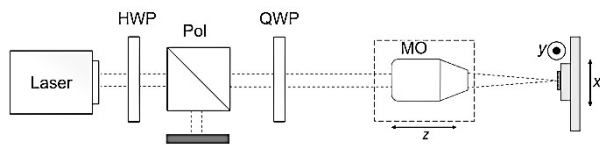


Fig. 1. Optical setup for CFRP laser ablation

The processed samples were analyzed using optical profilometry (SensoSCAN 6 profilometer with an EPI 20X v35 lens and SensoVIEW 1.8.0 software, Sensofar metrology).

SEM image (Fig. 2. a) shows that copper hydroxyapatite (Cu-HAp) particles have a highly aggregated morphology, consisting of nanoscale primary particles forming larger porous clusters. The surface is rough with significant texture and irregular growth pattern. The 1:1 mixture of Cu-HAp and Ca-HAp has a more homogeneous and densely packed structure (Fig. 2. b). The presence of Ca-HAp reduces the degree of agglomeration and promotes denser packing of particles. The particle size distribution becomes narrower, and the overall morphology becomes less porous compared to pure Cu-HAp.

The samples were analyzed using optical profilometry to evaluate the effect of calcium hydroxyapatite (Ca-HAp) on the laser ablation behavior of epoxy composites. Optimal laser parameters were selected for each composite type to

achieve clean and controlled ablation with minimal thermal damage (Table 1). This was done for an equivalent ablation volume at 10 μm deep.

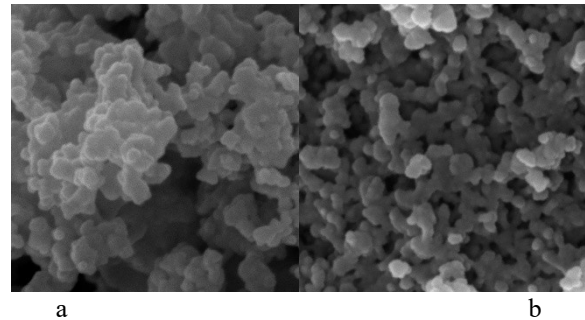


Fig. 2. SEM of synthesized particles (5 μm field of view):

a – Cu-HAp, b – 50%Cu-HAp+ 50%Ca-HAp

The addition of hydroxyapatite-based fillers significantly impacted on the optimal laser fluence, energy, and power required for effective ablation. The neat epoxy (without additives) required the lowest energy input (2,5 μJ) and fluence (10,3 J/cm<sup>2</sup>). Incorporation of 100% Cu-HAp slightly increased these values to 2,75 μJ and 11,4 J/cm<sup>2</sup>, respectively, indicating some enhancement of energy absorption due to the presence of copper ions, which likely contribute to increased local heat generation and absorption of the laser radiation.

With the progressive substitution of Cu-HAp by Ca-HAp, the energy thresholds increased noticeably. For the 75% Cu-HAp + 25% Ca-HAp composite, the optimal energy rose to 3,25 μJ, and for the 50% Cu-HAp + 50% Ca-HAp composition, it further increased to 3,75 μJ, along with a fluence of 16,0 J/cm<sup>2</sup> and power of 0,75 W. This trend suggests that the introduction of Ca-HAp, which is less absorbing power than Cu-HAp, modifies the thermal and optical properties of the composite, requiring higher laser input to initiate effective ablation. These findings indicate that not only the type of filler but also its ratio strongly influences the interaction of the material with femtosecond laser pulses.

Table 1

**Optimal femtosecond laser parameters**

Sample	Fluence, J/cm <sup>2</sup>	Energy, μJ	Power, W
Without additive	10,3	2,5	0,5
100% Cu-HAp	11,4	2,75	0,55
75%Cu-Hap +25%Ca-HAp	14,0	3,25	0,65
50%Cu-Hap +50%Ca-HAp	16,0	3,75	0,75

Increasing the power to ablate the same amount of material uses more energy, but it allows better control of the process to minimize damage. The results show that the Cu-HAp additive is best at absorbing laser radiation at 1030 nm.

To analyze the effect on surface morphology of the treated areas, an additional SEM photo was made (Fig. 3).

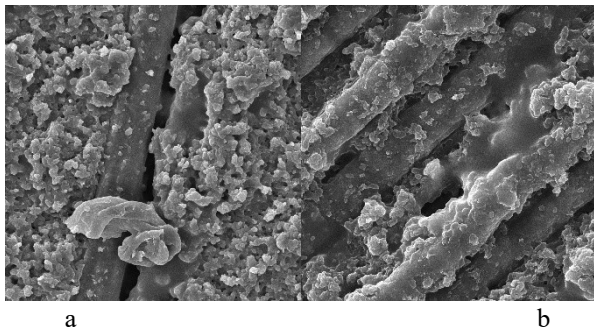


Fig. 3. SEM CFRP surface after laser ablation (50  $\mu\text{m}$  field of view): a – neat epoxy carbon fiber composite, b – CFRP with Cu-HAp additive

The CFRP surface after ablation is rough and irregular with extensive debris and signs of thermal degradation (Fig. 3 a). The polymer matrix is partially decomposed, forming amorphous structures, and the exposed carbon fibers are poorly defined, with signs of burning and delamination. This morphology indicates inefficient ablation, where excessive thermal energy leads to melting and resolidification rather than precise removal. The composite containing Cu-HAp (Fig. 3 b) demonstrates a smoother ablation pattern. The carbon fibers are cleaner and more distinct, with minimal surrounding debris. This improvement is due to the enhanced laser energy absorption and heat conductivity provided by the Cu-HAp additive. These observations suggest that the inclusion of Cu-HAp alters the thermal response of the material during laser exposure.

**Conclusion.** This study shows that hydroxyapatite-based fillers can effectively tailor the interaction of femtosecond laser radiation with CFRP composites. Copper-substituted hydroxyapatite (Cu-HAp) enhances near-infrared (NIR) absorption, improving the coupling efficiency between laser energy and the polymer matrix. The incorporation of Cu-HAp into the epoxy matrix enabled uniform and controlled ablation, with minimal heat-affected zones and smoother ablation profiles. In contrast, gradual substitution of Cu-HAp with calcium hydroxyapatite (Ca-HAp), a less absorptive but structurally similar filler, increased the energy thresholds required for

effective ablation. This indicates that copper ions modulate local heat generation and enhance NIR absorption. The combination of femtosecond laser processing with NIR-absorbing additives such as Cu-HAp offers a strategy for improving the precision and efficiency of CFRP micromachining. These findings optimize laser-based manufacturing techniques for composite materials, particularly in applications where thermal damage must be minimized.

**Funding.** This research was funded by the Research Council of Lithuania, grant number P-LU-24-46, and by the Ministry of Education and Science of Ukraine, agreement number M/50-2024, reg. number 0124U003362.

## References

1. Machining of carbon fibre reinforced plastics / E. Uhlmann et al. *Procedia CIRP*. 2014. Vol. 24. P. 19–24. URL: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.07.135>
2. Analysis and optimization of the heat affected zone of CFRP by femtosecond laser processing / M. Chen et al. *Optics & laser technology*. 2023. Vol. 167. P. 109756. URL: <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2023.109756>
3. Study on the CFRP nanosecond laser cutting damage and efficiency by aspiration system assisted method / C. Chen et al. *Journal of manufacturing processes*. 2023. Vol. 102. P. 95–105. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2023.07.031>
4. Femtosecond laser drill high modulus CFRP multidirectional laminates with a segmented arc-based concentric scanning method / C. Zhao et al. *Composite structures*. 2023. P. 117769. URL: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2023.117769>
5. Mechanism of selective texturing of CFRP by femtosecond laser / K. Li et al. *Composites part B: engineering*. 2024. P. 112000. URL: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2024.112000>
6. Comparison of the effects of femtosecond and nanosecond laser tailoring on the bonding performance of the heterojunction between PEEK/CFRP and Al–Li alloy / J. Chen et al. *International journal of adhesion and adhesives*. 2023. P. 103483. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2023.103483>
7. Absorbance study of powder conditions for laser additive manufacturing / B. Brandau et al. *Materials & design*. 2022. Vol. 216. P. 110591. URL: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2022.110591>
8. Nishiyama H., Nara H., Kawabe H. Direct laser microprinting of hydroxyapatite-clad structures by photoreduction-triggered nanomaterial deposition. *Optical materials express*. 2023. URL: <https://doi.org/10.1364/ome.506246>
9. Kolmas J., Marek D., Kolodziejki W. Near-Infrared (NIR) spectroscopy of synthetic

- hydroxyapatites and human dental tissues. Applied spectroscopy. 2015. Vol. 69, no. 8. P. 902–912. URL: <https://doi.org/10.1366/14-07720>
10. Exploring the various effects of Cu doping in hydroxyapatite nanoparticle / A. Noori et al. Scientific reports. 2024. Vol. 14, no. 1. URL: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-53704-x>
  11. Pérez-Barrado E., Darton R. J., Guhl D. Synthesis and applications of near-infrared absorbing additive copper hydroxyphosphate. MRS communications. 2018. Vol. 8, no. 03. P. 1070–1078. URL: <https://doi.org/10.1557/mrc.2018.144>.

**Баклан Д.В., Миронюк О.В., Білоусова А.О., Ванагас Е., Дослідження впливу адсорберів лазерного випромінювання на абляції фемтосекундними лазерними імпульсами армованого вуглецевим волокном пластику**

Армовані вуглепластики (CFRP) набули популярності завдяки своїм переважним властивостям, зокрема високому співвідношенню міцності до ваги, стійкості до хімічних речовин та гнучкості конструкції. Однак обробка цих композитних матеріалів залишається складним завданням через неоднорідність вуглецевих волокон і полімерної матриці. Лазерна обробка, особливо за допомогою надшвидких фемтосекундних лазерів, стала багатобічною технологією для точної обробки вуглепластиків. Перевагами цього методу є мінімальне термічне пошкодження та підвищена точність абляції. Однак різниця у швидкості абляції між епоксидною матрицею та вуглецевими волокнами часто перешикодує ефективності процесу. У цьому дослідженні вивчається використання добавок на основі гідроксиапатиту для покращення взаємодії лазера з матеріалом та оптимізації поведінки при абляції систем з вуглепластику. Зокрема, мікрочастинки коп-пер-заміщеного гідроксиапатиту (Cu-Нар), які відомі своїм сильним поглинанням в ближній інфрачервоній області (NIR) близько 1030 нм, були синтезовані і введені в епоксидну матрицю. Гі-дроксиапатит кальцію (Ca-Нар), термічно стабільна і біосумісна кераміка з низьким поглинанням в ближній інфрачервоній області, був використаний як еталон для оцінки питомого внеску іонів міді. Епоксидні композити з 5 мас. % різних композицій наповнювачів (100% Cu-Нар, 75% Cu-Нар/25% Ca-Нар та 50% Cu-Нар/50% Ca-Нар) були підготовлені та інкорпоровані в ламінати CFRP. Фемтосекундну лазерну абляцію при 1030 нм проводили в оптимізованих умовах для кожного типу зразків, після чого оцінювали морфологію поверхні за допомогою оптичної профілометрії та СЕМ. Результати показали, що включення наповнювачів

Cu-Нар сприяло підвищеному поглинанню енергії, тим самим сприяючи більш ефективній абляції зі зменшеним термічним пошкодженням порівняно з немодифікованою епоксидною смолою і системами, наповненими Ca-Нар. Заміна Cu-Нар на Ca-Нар збільшила необхідну інтенсивність лазерного випромінювання та енергоспоживання. Це вказує на те, що іони міді посилюють локалізоване нагрівання та зв'язок енергії. SEM-зображення показали, що частинки Cu-Нар мають пористу, агреговану морфологію, яка перерозподіляє теплову енергію, в той час як Ca-Нар має щільнішу, одноріднішу структуру наповнювача зі зменшеною пористістю. Ця робота показує потенціал Cu-Нар як функціональної добавки для регулювання взаємодії фемтосекундного лазерного випромінювання з композитними матеріалами та покращення результатів мікрообробки. Отримані результати підтверджують доцільність використання керамічних наповнювачів, що поглинають інфрачервоне випромінювання, для вирішення загальних проблем, пов'язаних з лазерною обробкою вуглепластиків, включаючи зони термічного впливу та абляційну неоднорідність.

**Ключові слова:** CFRP; вуглецеве волокно; лазерна обробка; фемтосекундний лазер; різання; абляція.

**Баклан Денис Віталійович** – доктор філософії, асистент, кафедри хімічної технології композиційних матеріалів, хіміко-технологічний факультет Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", [d.baklan@kpi.ua](mailto:d.baklan@kpi.ua).

**Миронюк Олексій Володимирович** – доктор технічних наук, доцент, завідувач кафедри хімічної технології композиційних матеріалів, хіміко-технологічний факультет Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", [o.muronyuk@kpi.ua](mailto:o.muronyuk@kpi.ua).

**Білоусова Анна Олегівна** – аспірант, асистент кафедри хімічної технології композиційних матеріалів, хіміко-технологічний факультет Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", [a.bilousova@kpi.ua](mailto:a.bilousova@kpi.ua).

**Ванагас Егідіюс** – доктор філософії, головний науковий співробітник лабораторії когерентної оптики, відділ фундаментальних досліджень, Центр фізичних наук і технологій (Вільнюс, Литва), [egidijus.vanagas@ftmc.lt](mailto:egidijus.vanagas@ftmc.lt)

Стаття подана 10.05.2025.

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-291-5-64-73>

УДК 66.017

## РІДИННО-ВІДШТОВХУВАЛЬНІ ІНФУЗОВАНІ ПОВЕРХНІ: ОГЛЯД СУЧАСНИХ ТЕНДЕНЦІЙ ТА ПЕРСПЕКТИВ

Маковський Д.П., Миронюк О.В.

### LIQUID-REPELLENT INFUSED SURFACES: A REVIEW OF CURRENT TRENDS AND PROSPECTS

Makovkyi D.P., Myronyuk O.V.

*У статті представлено узагальнений огляд сучасного стану досліджень у галузі рідинно-інфузованих поверхонь, що становлять перспективний напрям у створенні функціональних покриттів із керованими змочувальними властивостями. На основі аналізу актуальних літературних джерел розглянуто ключові фізико-хімічні принципи, що лежать в основі формування інфузованих поверхонь, включаючи наявність стабільного мастильного шару, утримуваного в капілярно-активній пористій або текстурованій матриці, поверхневу енергію твердого субстрату та механізми взаємодії між фазами. Порівняно властивості рідинно-інфузованих поверхонь (РІП) із традиційними супергідрофобними покриттями, зокрема щодо довговічності, стабільності при експлуатації в агресивному середовищі, а також самоочисної, антикорозійної та антиобмерзальної дії.*

*У статті систематизовано сучасні підходи до виготовлення РІП на основі як гідрофобних, так і гідрофільних текстур із подальшою інфузією мастил, що мають хімічну спорідненість із матрицею. Особливу увагу приділено використанню новітніх матеріалів, зокрема полімерів, наноструктурованих оксидів металів і біосумісних мастильних рідин, які забезпечують як функціональність, так і екологічну безпечність покриттів. Розглянуто створення адаптивних поверхонь, здатних до динамічної зміни своїх властивостей у відповідь на зовнішні стимули, зокрема вплив світла, температури або магнітного поля. Висвітлено ключові проблеми, пов'язані із забезпеченням механічної, хімічної та термічної стабільності РІП у реальних умовах експлуатації, включаючи цикли замерзання/танення, динамічні навантаження та контакт із агресивними рідинами.*

*Проаналізовано актуальні напрями застосування інфузованих поверхонь у сучасних технічних і промислових системах, зокрема в технологіях запобігання обмерзанню, антикорозійному захисті, біомедичних пристроях, мембранному розділенні рідин, мікрофлюїдних компонентах та покриттях із низьким коефіцієнтом зчеплення. Показано, що РІП мають значний міждисциплінарний потенціал для впровадження в енергетиці, охороні довкілля, транспорті, медицині та інших галузях, за умови подолання наявних технічних, технологічних і екологічних бар'єрів. Узагальнено перспективи подальшого розвитку цієї інноваційної технології в контексті матеріалознавства, прикладної інженерії та сталого виробництва.*

**Ключові слова:** рідинно-інфузовані поверхні; змочування; антиобмерзання; антикорозійний захист;

**Вступ.** Змочування є фундаментальним фізичним явищем, що визначає взаємодію рідин із твердими поверхнями. Цей процес має ключове значення для великої кількості природних і техногенних процесів, включаючи транспортування рідин у ґрунтах, функціонування біологічних тканин, утворення конденсату, а також розробку сучасних матеріалів з контрольованими адгезійними властивостями [1].

Упродовж останніх десятиліть значна увага приділяється створенню супергідрофобних поверхонь, які демонструють надзвичайно високі контактні кути ( $>150^\circ$ ) та низьку адгезію рідин. Такі поверхні зазвичай імітують мікро- та наноструктури, подібні до поверхні листя лотоса, завдяки чому вода скочується з них,

забираючи із собою частинки пилу [2]. Супергідрофобні матеріали мають потенціал у таких сферах, як самоочищення, антикорозійний захист, проти замерзання та біомедичне устаткування.

**Постановка проблеми.** Традиційні супергідрофобні покриття мають ряд суттєвих обмежень. Зокрема, їх ефективність знижується у вологих умовах, де відбувається конденсація вологи в мікропорах, що порушує ефект Кассі-Бакстера [3]. Також вони вразливі до ударів крапель, особливо при високих швидкостях, які можуть руйнувати повітряні кишені на поверхні [4]. Крім того, такі покриття погано працюють за низьких температур, де спостерігається утворення льоду та зниження антиприлипальних властивостей.

У зв'язку з цим зростає інтерес до нових підходів, зокрема рідинно-інфузованих поверхонь (РІП), які поєднують високі антимочувальні властивості з механічною стабільністю та стійкістю до вологи й обмерзання [5].

Рідинно-інфузовані поверхні (Liquid-Infused Surfaces, РІП) є новим класом функціональних покриттів, що виник як відповідь на обмеження традиційних супергідрофобних технологій. Основним принципом РІП є створення стабільного шару рідини, який утримується в мікро- або наноструктурованій твердій матриці за рахунок капілярних сил та хімічної сумісності. Така система утворює гладку, омочену поверхню з низьким коефіцієнтом тертя, що дозволяє ефективно відштовхувати рідини, запобігати обростанню, обмерзання та забрудненню [5-6].

Для реалізації рідинно-інфузованих поверхонь необхідною умовою є наявність трьох взаємопов'язаних компонентів. Насамперед це пориста або текстурована поверхня, здатна утримувати мастило завдяки дії капілярних сил. Другим критичним елементом є рідина-інфузант, яка повинна бути хімічно спорідненою з твердою матрицею, але водночас несумісною з зовнішніми рідинами [7]. Третім компонентом є стабільна взаємодія між твердою фазою та мастилом, що запобігає витісненню рідини під впливом вологи, тиску або інших зовнішніх чинників.

Концепція РІП була вперше запропонована у 2011 році групою вчених з Гарвардського університету під керівництвом Джоанни Айзенберг. Їх надихнула здатність хижої рослини *Nepenthes* (рис. 1) утворювати стабільну рідинну плівку на внутрішній

поверхні пастки, що забезпечує надзвичайну слизькість. Відтоді технологія РІП стрімко розвивається, охоплюючи сфери від антиобмерзання до біомедицини [5].



Рис. 1. Хижа рослина *Nepenthes*

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Фізико-хімічні засади змочування, включаючи капілярні ефекти, описано в класичних роботах [1, 8], які сформували теоретичну базу для подальших досліджень поверхневої енергії та контактного кута [9-11]. Принципи супергідрофобності та біоміметичних структур, що імітують природні поверхні (наприклад, листя лотоса), узагальнено в оглядових роботах [2, 3], де також проаналізовано вплив шорсткості та адгезії на змочування.

Обмеження супергідрофобних поверхонь у складних умовах (волога, конденсат, обмерзання, механічні навантаження) викладені в роботах [4, 25, 26], що підкреслює необхідність пошуку альтернативних рішень. Саме такою альтернативою стали рідинно-інфузовані поверхні (РІП), концепція яких була запропонована в дослідженні [5], а її ефективність у біозахисті та антиприлипанні доведено в [6, 7].

Особливу увагу приділено взаємодії мастильного шару з пористою матрицею та його хімічній стабільності [7, 19]. Розширення можливостей РІП через використання адаптивних мастил (фотореактивних, магніточутливих) описано в [16, 17], де підкреслюється роль зовнішніх стимулів у зміні властивостей поверхні. Праці [12, 15, 27] демонструють успішне застосування РІП у

зниженні обмерзання, антикорозійному захисті та зборі вологи.

Виготовлення РПП з використанням спінювання CO<sub>2</sub> дозволяє отримувати стабільні пористі структури без утворення твердих відходів [13], а біоміметичні матеріали на основі SnO<sub>2</sub> або магнієвих сплавів демонструють відмінну корозійну стійкість і здатність до самовідновлення [14, 28]. Питання довговічності та стабільності таких покриттів, включаючи механічну, хімічну та термічну стійкість, глибоко досліджено в працях [18–22], де також наведено дані щодо оптимальних параметрів мастил (в'язкість, адгезія, леткість) та типів субстратів.

Згідно з даними з платформи ScienceDirect, спостерігається різке зростання кількості наукових публікацій, пов'язаних із РПП. Починаючи з 2015 року, коли ця технологія лише починає широку наукову апробацію, кількість статей щороку зростає, досягнувши піку понад 3700 публікацій у 2024 році (рис 2).

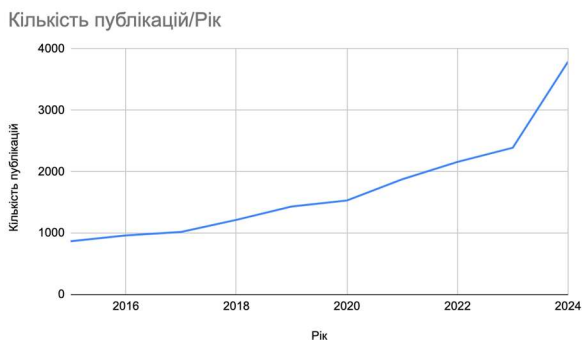


Рис. 2. Кількість публікацій з ключовими словами *liquid-infused surfaces* на ScienceDirect у 2015–2024 роках

Незважаючи на велику кількість практичних досліджень та оглядових публікацій, галузь вивчення рідинно-інфузованих поверхонь залишається динамічною й швидко зростає. Це зумовлює потребу в актуалізованих оглядах, які не лише систематизують останні наукові досягнення, але й допомагають виявити прогалини в знаннях для подальшого цілеспрямованого розвитку цієї технології.

**Метою** цієї роботи є здійснити огляд сучасного стану розвитку досліджень в галузі інфузованих рідинами текстурованих поверхонь для встановлення напрямів розвитку, практичного застосування та впровадження технології.

**Постановка задачі.** З огляду на стрімкий розвиток досліджень у сфері рідинно-інфузованих поверхонь та зростання кількості наукових публікацій, актуальним стає завдання систематизації наявних знань і технологічних рішень у цій галузі. Незважаючи на численні практичні роботи, потреба в узагальненому аналізі фізико-хімічних принципів, методів виготовлення, функціональних властивостей і напрямів застосування РПП залишається актуальною. Задачею цієї роботи є проведення цілісного огляду сучасного стану технології рідинно-інфузованих поверхонь, виявлення ключових досягнень та викликів, а також визначення перспектив подальшого розвитку з урахуванням наукових і прикладних потреб.

**Викладання основного матеріалу.** У основі опису змочування поверхні рідиною лежить рівняння Юнга [8], яке визначає рівноважний кут змочування  $\theta$  на гладкій однорідній поверхні. Було виведено залежність рівноважного крайового кута ( $\cos\theta$ ) від сил поверхневого натягу:

$$\cos\theta = \frac{\sigma_{ТВ} - \sigma_{Ж}}{\sigma_{ТВ-Ж}}, \quad (1)$$

де  $\sigma_{ТВ}$  – поверхневий натяг на межі тверда поверхня/газ;  $\sigma_{ТВ-Ж}$  – поверхневий натяг на межі поділу фаз тверда поверхня/рідина;  $\sigma_{Ж}$  – поверхневий натяг на межі рідина/газ.

Кут змочування визначається як кут, утворений перетином межі розділу рідина/тверда речовина та межі розділу рідина/повітря. Його також можна описати як кут між поверхнею твердого зразка та дотичною до яйцеподібної форми краплі на краю краплі.

Гідрофільною називається така поверхня, яка має високу спорідненість до води, тобто добре змочується водою. Це означає, що крапля води на такій поверхні розтікається, утворюючи низький кут змочування (менше ніж 90°). Такі поверхні активно взаємодіють із молекулами води завдяки наявності полярних груп, які здатні утворювати водневі зв'язки.

Гідрофобною є поверхня, яка має низьку спорідненість до води, тобто відштовхує воду. У цьому випадку крапля води має високий кут змочування (понад 90°), зберігає сферичну форму і не розтікається. Особливо супергідрофобними вважаються поверхні з кутом змочування >150° і дуже низьким кутом скошування (<10°), що дозволяє краплі легко скошуватись із поверхні.

Теорія Зісмана (Zisman's Method) - одна з найперших емпіричних моделей, яка використовується для оцінки поверхневої енергії твердих тіл. Вперше запропонована В. А. Зісманом у 1964 році, ця методика ґрунтується на експериментальному визначенні кутів змочування для серії рідин з відомим поверхневим натягом на досліджуваній твердій поверхні.

Зісман виявив, що для неполярних рідин існує лінійна залежність між косинусом контактного кута ( $\cos \theta$ ) та поверхневим натягом рідини. Цю залежність можна екстраполювати до значення  $\cos \theta = 1$  (тобто до повного змочування), що відповідає певному значенню критичного поверхневого натягу, яке вказує на здатність твердої фази змочуватись певним класом рідин.

Обмеження даної теорії полягають в наступному. Модель застосовна переважно для неполярних або слабкополярних рідин. Не враховує кислотно-основні чи специфічні міжмолекулярні взаємодії. Вважає енергію твердого тіла єдиним скалярним параметром, що не відображає фізичну складність реальних поверхонь [9].

Теорія Оуенса–Вендта (Owens–Wendt method). Ця модель була запропонована у 1969 році й стала значним кроком уперед у порівнянні з моделлю Зісмана. Вона враховує, що поверхнева енергія складається з двох компонентів дисперсної ( $\gamma^d$ ) та полярної ( $\gamma^p$ ).

Контактний кут  $\theta$  для кожної рідини обчислюється за модифікованим рівнянням Юнга і виражається через добуток відповідних компонентів енергії рідини і твердого тіла. Для побудови графіка необхідно мати контактні кути мінімум двох рідин з відомими значеннями  $\gamma^d$  та  $\gamma^p$ . Це дає змогу розв'язати систему рівнянь і визначити обидві компоненти енергії твердої поверхні.

Переваги даної теорії. Придатна для полімерних і складних поверхонь. Показує окремо вплив полярної та неполярної взаємодії. Широко використовується у фізичній хімії та матеріалознавстві [10].

Теорія Ван Осса–Чаудхурі–Гуда (van Oss–Chaudhury–Good або vOCG) Ця теорія є найбільш фізично обґрунтованою з усіх трьох. Вона виходить з уявлень про те, що поверхнева енергія включає дисперсні (неполярні) сили ( $\gamma^{LW}$ ) і полярні (кислотно-основні) сили, які поділяються на кислотну (електронно-акцепторну) складову ( $\gamma^+$ ) та основну

(електронно-донорну) складову ( $\gamma^-$ ). Сумарна поверхнева енергія описується як:

$$\gamma = \gamma^{LW} + \gamma^{AB} = \gamma^{LW} + 2\sqrt{\gamma^+ \gamma^-}, \quad (2)$$

Дані компоненти визначаються через серію контактних кутів з трьома рідинами — зазвичай вода, формамід та дійодметан — з відомими енергетичними характеристиками.

Переваги даної теорії. Враховує кислотно-основні взаємодії, що є критично важливими у біологічних системах та адгезії. Може бути застосована до гідрофільних, заряджених та біоактивних поверхонь. Є однією з найбільш точних моделей, хоча й складною у використанні [11].

Рідинно-інфузовані поверхні (РІП) мають низку суттєвих переваг порівняно з традиційними супергідрофобними покриттями. Супергідрофобні поверхні, засновані на мікро- і наноструктурах, що імітують природні, наприклад листя лотоса. Демонструють надзвичайно високі кути змочування та ефект самоочищення. Проте такі поверхні є вразливими до механічних пошкоджень, впливу конденсату, високої вологості та навіть до дії крапель, що падають із певною швидкістю. Крім того, вони мають обмежену ефективність у боротьбі з обмерзанням, а також не здатні до самовідновлення [12].

На відміну від них, РІП забезпечують значно вищу довговічність завдяки наявності стабільного шару в'язкої рідини, який не лише захищає тверду поверхню, але й зменшує тертя між рідиною та поверхнею [5]. Ця рідина здатна частково перерозподілятися у разі локальних пошкоджень, забезпечуючи ефект самовідновлення [6]. Важливо також, що РІП демонструють репелентність не лише до води, а й до широкого спектра рідин — у тому числі олій, органічних розчинників і біологічних середовищ. Така універсальність робить їх більш придатними для практичного застосування в умовах змінного середовища, включно з біомедичними технологіями, морською інженерією та антикорозійними покриттями.

Отже, хоча РІП можуть мати дещо нижчі контактні кути порівняно зі супергідрофобними покриттями, їхні експлуатаційні переваги — довговічність, широка хімічна стійкість і здатність до самовідновлення — роблять їх більш функціональними та надійними у ряді критичних застосувань.

**Стратегії виготовлення.** Основними стратегіями створення РПП є формування пористої текстури на субстраті та введення в неї відповідної в'язкої рідини.

**РПП на гідрофобних текстурах.** Для створення рідинно-інфузованих поверхонь (РПП) ключовим є формування гідрофобної або супергідрофобної текстури, здатної утримувати мастильну фазу. Такі текстури зазвичай представляють собою мікро- або наноструктуровані шари, виготовлені з матеріалів із низькою поверхневою енергією, або покриті гідрофобізуючими агентами (наприклад, фторвмісними силанами).

Впровадження мастил у такі текстури відбувається завдяки капілярним силам і взаємодіям між матеріалом поверхні та рідиною. Для забезпечення стабільного утримання мастила необхідно дотримуватись капілярної сумісності: мастило повинно краще змочувати текстуру, ніж зовнішні рідини, з якими взаємодіє поверхня. У випадку успішного впровадження формується стабільний мастильний шар, який захищає структуру, створює бар'єр для проникнення інших рідин і забезпечує ефективне ковзання крапель [5].

Серед типових матеріалів для гідрофобних структур, які використовуються в РПП, можна виділити:

Полімерні матриці, такі як полістирен, полідиметилсилоксан, поліуретани – через їх низьку поверхневу енергію та гнучкість. У дослідженні [13] представлено новий підхід до створення РПП на основі пористого полістиролу, виготовленого за допомогою газообмеженої технології спінування надкритичним  $\text{CO}_2$ . Метод дозволяє отримувати однорідну пористу структуру з регульованими параметрами, що забезпечує високу зсувостійкість покриттів (гістерезис кута змочування =  $4.4^\circ$  після 10 хв при 8500 об/хв) без утворення твердих відходів та з підвищеною ефективністю виробництва.

Наноструктуровані оксиди металів — наприклад,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{ZnO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  — забезпечують багаторівневу шорсткість і стабільність. У роботі [14] розроблено біоміметичне покриття на основі пористого  $\text{SnO}_2$  із подальшим створенням рідинно-інфузованої поверхні за участі силіконового мастила. Отримане РПП демонструє відмінну корозійну стійкість (ефективність 99,6% після 180 год у 3,5%  $\text{NaCl}$ ) та здатність до самовідновлення після механічних пошкоджень, що свідчить про його високий потенціал для практичного використання.

Правильна архітектура поверхні та капілярна сумісність дозволяють мастилу залишатися стабільно закріпленим навіть під дією механічного навантаження або змін температури, що визначає довготривалу функціональність РПП-систем.

**РПП на гідрофільних текстурах.** Окрім традиційного використання гідрофобних матриць для створення рідинно-інфузованих поверхонь (РПП), існує також ефективний підхід на основі гідрофільних текстур. У цьому випадку гідрофільні підкладки потребують хімічної або фізичної модифікації для покращення адгезії мастила й утримання його всередині мікро- або наноструктур. Часто застосовують оксидні шари (наприклад,  $\text{TiO}_2$  або  $\text{SiO}_2$ ), які забезпечують стабільне закріплення мастила за рахунок капілярних сил та хімічної спорідненості.

Процес створення включає формування пористої або текстурованої поверхні з високою питомою площею та подальшу модифікацію функціональними групами, які сприяють стабілізації мастила — наприклад, силанування або полімерне покриття. Це дозволяє утримувати мастило навіть на поверхнях, які спочатку мають високу змочуваність водою, і забезпечує стабільні антирозповсюджувальні властивості.

Такий підхід відкриває можливості для створення РПП на основі широкого спектру матеріалів, включаючи скло, метали, кераміку та полімери, що особливо важливо для біомедичних застосувань, сенсорики, антикорозійного захисту та антиизмерзальних систем.

В роботі [15] було розроблено смугасті поверхні з чергуванням супергідрофільних і суперкогезійних ділянок на основі кремнію для підвищення ефективності збору туману. Такі поверхні забезпечують швидке зародження крапель, їхнє спрямоване транспортування та високу ефективність конденсації, що на 86,9% перевищує ефективність незміненого кремнію.

Адаптивні поверхні. Останні дослідження у сфері рідинно-інфузованих поверхонь зосереджені на розробці інтелектуальних або адаптивних текстур, які здатні реагувати на зовнішні стимули, такі як ультрафіолетове випромінювання, зміни температури, електричне або магнітне поле, хімічні впливи тощо. Ці поверхні демонструють змінну змочуваність і забезпечують керовану маніпуляцію краплями, що робить їх перспективними для мікрофлюїдних пристроїв,

біомедичних сенсорів, систем доставки рідин та активного контролю конденсації.

Один із підходів — використання фотореактивних мастил або полімерів, що змінюють свої властивості під дією УФ-світла. Наприклад, мастила з азобензеновими або флуоресцентними функціональними групами можуть реверсивно змінювати свою змочувальність під впливом опромінення, дозволяючи відкривати або закривати канали для рідини на вимогу [16].

Інший підхід базується на впровадженні магніточувливих наночастинок у мастило. Завдяки зовнішньому магнітному полю можна локально змінювати форму або розташування мастильної фази, що забезпечує динамічне переміщення крапель або активацію зон змочування. Цей механізм дозволяє створювати відновлювані й програмовані патерни на поверхні [17].

Загалом, адаптивні РПП відкривають новий вимір функціональності в галузі інженерії поверхонь, особливо коли потрібна динамічна, неінвазивна і точна зміна властивостей поверхні в реальному часі.

**Стабільність інфузованих поверхонь.** Стабільність інфузованих поверхонь (РПП) є ключовим фактором для їх практичного застосування в умовах навколишнього середовища, де присутні механічні, хімічні або термічні впливи. Незважаючи на високу ефективність у відштовхуванні рідин, довговічність таких систем значною мірою залежить від здатності утримувати мастильний шар у текстурованій матриці, а також зберігати свої змочувальні властивості при механічних навантаженнях, впливі температур, агресивних речовин чи тривалого використання. У цьому розділі розглядаються основні аспекти стабільності РПП, включаючи механічну, хімічну, термічну стійкість, а також стабільність мастильного шару.

Механічна стабільність інфузованих поверхонь. Механічна стабільність рідинно-інфузованих поверхонь (РПП) є критично важливою для їхнього практичного застосування, особливо в умовах інтенсивного зношування, динамічних навантажень та тривалого впливу навколишнього середовища.

Довговічність рідинно-інфузованих поверхонь визначається низкою ключових факторів, серед яких особливе значення має в'язкість мастила. Зокрема, мастила з високою в'язкістю (1000–3000 cSt) демонструють зменшену втрату через явища коагуляції та

утворення змочувальних гребенів, що сприяє тривалішому збереженню функціональних властивостей поверхні. Крім того, така в'язкість забезпечує ефективне самовідновлення мастильного шару після локальних механічних пошкоджень, що критично важливо для стабільності РПП. Ще одним важливим аспектом є стійкість до динамічних навантажень: поверхні повинні зберігати свої властивості під впливом зсувних сил, вібрацій або періодичних механічних впливів. Нарешті, тривала експлуатація у реальних умовах передбачає не лише механічну, а й хімічну стійкість до вологи та агресивних середовищ, що є вирішальним для впровадження РПП у практичні застосування [18].

Таким чином, для забезпечення високої механічної стабільності РПП необхідно враховувати вибір відповідного мастила, конструкцію поверхні та умови експлуатації.

Хімічна стабільність рідинно-інфузованих поверхонь визначається низкою взаємопов'язаних факторів, серед яких ключовими є тип мастила, матеріал субстрату та мікро-/наноструктура поверхні. Зокрема, фторовані мастила, як-от перфторполієфіри (PFPE), демонструють виняткову стійкість до кислот, лугів та органічних розчинників завдяки своїй хімічній інертності, низькій леткості та високій термічній стабільності [19]. Вибір хімічно інертних матеріалів для субстрату, таких як оксиди металів (наприклад,  $Al_2O_3$  або  $TiO_2$ ) або флуоровуглецеві полімери, додатково підвищує загальну стійкість покриття до агресивних середовищ [20]. Створення мікро- або нанотекстурованої структури відіграє важливу роль у стабілізації мастильного шару: вона не лише сприяє кращому його утриманню, але й запобігає витісненню рідини під дією хімічних агентів [21]. У результаті поєднання цих факторів поверхні демонструють високі експлуатаційні характеристики, включаючи стійкість до екстремальних значень рН. Деякі інфузовані алюмінієві поверхні зберігають свої властивості навіть після занурення в розчини з рН 1 та рН 14 [20].

Термічна стабільність інфузованих поверхонь. Термічна стабільність є важливим параметром, що визначає довговічність та придатність РПП у жорстких умовах експлуатації. Високі температури можуть призводити до випаровування або витіснення мастила, а також до деградації текстурованої структури. Для підвищення термостійкості застосовуються стійкі мастильні матеріали, такі

як перфторполіефіри, та термостабільні підкладки, зокрема оксиди металів ( $Al_2O_3$ ,  $TiO_2$ ) або алюміній [20].

Дослідження продемонстрували, що алюмінієві РПП без використання фторвмісних сполук зберігають свою антиобмерзальну здатність після термічної обробки при  $150\text{ }^\circ\text{C}$ , що свідчить про високу термічну стабільність [20]. У роботі вивчено динаміку змочування при нагріванні і показано, що ріст країв змочування мастила (wetting ridge) на нанотекстурах змінюється з підвищенням температури, що впливає на утримання мастила. Додатково продемонстрували можливість проєктування РПП з підвищеною ударостійкістю і стійкістю до термонавантажень за рахунок комбінування мікро- та наноструктур [22].

Таким чином, використання стабільних мастил, термостійких матеріалів і раціонального дизайну мікроструктур дозволяє створювати РПП, які зберігають свої властивості при підвищених температурах та забезпечують тривалий захист поверхні в агресивних умовах.

**Типові застосування інфузованих поверхонь.** Рідинно-інфузовані поверхні є перспективним класом функціональних матеріалів, що характеризуються високою стабільністю, низьким коефіцієнтом тертя, відштовхувальною здатністю до широкого спектра рідин і здатністю до самовідновлення. Завдяки цим властивостям, РПП знаходять практичне застосування в різноманітних галузях — від антикорозійного захисту та антиобмерзальних покриттів до біомедичних імплантів, мікрофлюїдних пристроїв та систем збирання рідини. Їх здатність забезпечувати кероване змочування, мінімізувати адгезію та перешкоджати забрудненню робить ці поверхні особливо цінними для експлуатації в умовах агресивного хімічного або механічного середовища. У наступних підрозділах буде систематизовано актуальні напрями використання РПП, а також наведено сучасні приклади реалізації технології відповідно до наукових досліджень останніх років.

Розділення олії та води. Рідинно-інфузовані поверхні (РПП) демонструють високий потенціал у розділенні водно-олійних сумішей завдяки своїм унікальним властивостям змочування та низькому коефіцієнту тертя. Їх застосування дозволяє ефективно відокремлювати воду від олії, що є критично важливим у багатьох промислових процесах, включаючи очищення стічних вод, нафтову промисловість та харчову індустрію.

Мембрана ZIF-LF з ультраслизькими властивостями. Дослідження [23] описує мембрану на основі ZIF-LF, яка використовує воду як природне мастило. Ця мембрана показує високу відштовхувальну здатність до олійних рідин, що робить її ефективною для розділення водно-олійних сумішей.

Кварцові фільтраційні середовища для промислового розділення води та олії. Робота [24] зосереджена на розробці та оптимізації кварцових фільтраційних середовищ для промислового розділення води та олії, з акцентом на покращення змочуваності поверхні, мінімізацію забруднення та підвищення ефективності відторгнення олії.

Антизледеніння. Утворення льоду на твердих поверхнях становить серйозну проблему для авіації, енергетики, телекомунікацій, транспорту та побутових систем. РПП-покриття демонструють значний потенціал у протидії зледенінню завдяки своїй низькій адгезії до крапель води, що знижує ймовірність нуклеації льоду та полегшує його видалення.

Пасивні стратегії базуються на мінімізації енергії взаємодії між краплею та поверхнею. Завдяки наявності стабільного мастильного шару, РПП знижують температуру нуклеації льоду і сповільнюють його ріст. Наприклад, дослідження показують, що температура початку замерзання на РПП може бути на кілька градусів нижчою, ніж на супергідрофобних поверхнях [25].

Активні стратегії включають використання зовнішніх стимулів — наприклад, фото-, термо- або електроактивації — для змінення властивостей мастила або самої поверхні. Деякі РПП з фотореактивними компонентами дозволяють локально змінювати змочуваність під впливом світла, запобігаючи налипанню кристалів льоду [26].

Завдяки здатності до самовідновлення та низькому значенню критичного зусилля відриву льоду, РПП-покриття можуть багаторазово протистояти циклам замерзання/відтавання без значної деградації своїх властивостей. Таким чином, вони є перспективним матеріалом для застосування в умовах підвищеної вологості та низьких температур

Антизабруднення. РПП демонструють високий потенціал у зменшенні забруднення біологічного та хімічного походження, особливо в умовах, де традиційні покриття виявляються недостатньо ефективними. Завдяки низькій адгезії до білків, мікроорганізмів і біоплівки,

РІП значно знижують рівень біозабруднення на медичних пристроях, фільтраційних мембранах, суднових корпусах та в інших середовищах, схильних до біологічного обростання. Масильний шар забезпечує динамічну бар'єрну функцію, що перешкоджає прикріпленню організмів та частинок навіть у складних експлуатаційних умовах. Наприклад, у морському середовищі РІП здатні ефективно запобігати адгезії водоростей, бактерій та інших морських організмів, подовжуючи термін служби конструкцій і зменшуючи потребу в обслуговуванні [25].

Антикорозія. РІП мають потенціал у захисті металів, таких як мідь (Cu), магній (Mg) та сталь, від корозії. Завдяки створенню фізичного бар'єру, який перешкоджає проникненню води, кисню та інших агресивних агентів до металевої поверхні, РІП значно знижують швидкість корозійних процесів.

Дослідження показали, що РІП на основі оцинкованої сталі забезпечують високу корозійну стійкість навіть після тривалого впливу агресивних середовищ, таких як соляні розчини та кислотні дощі. Це досягається завдяки стабільному масильному шару, який зберігає свої властивості навіть після механічного зносу та впливу зовнішніх факторів [27].

У випадку магнієвих сплавів, які особливо схильні до корозії, застосування РІП з самовідновлювальними властивостями дозволяє ефективно захищати поверхню від агресивного морського середовища. Такі покриття здатні зменшити адгезію бактерій та інших біологічних агентів, що сприяє зниженню мікробіологічної корозії [28].

Крім того, новітні дослідження демонструють, що РІП, виготовлені за допомогою методів, таких як лазерне травлення та інфузія масил, можуть забезпечити ефективний захист від корозії для різних металів, включаючи алюміній та його сплави. Ці покриття характеризуються високою стійкістю до механічного зносу та довготривалою стабільністю в агресивних умовах [14].

**Перспективи розвитку.** Незважаючи на значний прогрес у створенні РІП, перед цією технологією досі стоять серйозні виклики. Зокрема, обмежена довготривала стабільність покриттів та поступове виснаження масильного шару під впливом механічних, термічних або хімічних навантажень залишаються ключовими проблемами. Багатоетапні та дорогі методи формування

мікро- і наноструктур ускладнюють масштабування виробництва РІП.

Для подолання цих обмежень розробляють нові матеріали та системи. Зокрема, активно досліджують екологічно безпечні мастила на основі біорозкладних або їстівних олій і композитні матриці з натуральних полімерів. РІП, виготовлені з біорозкладних полімерних волокон і харчових олій, продемонстрували високу довговічність та антизабруднюючі властивості. Подібні рішення зменшують екологічне навантаження та відкривають перспективи нових застосувань (наприклад, у пакуванні харчових продуктів чи біомедицині).

Інші напрями включають адаптивні поверхні із здатністю до самовідновлення та реагування на зовнішні стимули. Так, розробляють адаптивні РІП, які під дією температури, електричних чи магнітних полів можуть змінювати свої властивості або оновлювати масильний шар. Використання органогелів та гідрогелів як пористих матриць забезпечує внутрішній резервуар мастила й підвищує здатність до самозалікування поверхні.

Ключовими завданнями також є масштабування технології та її тестування в реальних умовах. Необхідно перейти від лабораторних зразків до промислових процесів і польових випробувань. Наприклад, ARPA-E фінансує проєкт зі створення та тестування РІП-покриттів для морського транспорту, спрямованих на зниження енергоспоживання суден. Разом із тим, впровадження РІП потребує спрощених і масштабованих технологій нанесення (які можна застосовувати на поверхнях будь-якого розміру).

**Висновок.** Рідинно-інфузовані поверхні (РІП) становлять інноваційний клас функціональних покриттів, що поєднують у собі високу хімічну інертність, механічну стабільність, універсальну рідиновідштовхувальність та здатність до самовідновлення. Завдяки наявності стабільного масильного шару в пористій або текстурованій матриці, РІП демонструють переваги над традиційними супергідрофобними поверхнями, зокрема в аспектах довговічності, стійкості до обмерзання, забруднення й корозії, а також функціонування в агресивних середовищах.

Огляд сучасної літератури засвідчує зростаючий науковий і прикладний інтерес до цієї технології. Розроблено низку стратегій створення РІП як на гідрофобних, так і на гідрофільних підкладках, із використанням

полімерних, оксидних та композитних матеріалів. Особливої уваги набувають адаптивні поверхні, здатні до реагування на зовнішні стимули, що розширює функціональні можливості РІП у високотехнологічних застосуваннях.

Разом з тим, технологія потребує подальших досліджень у напрямках підвищення довготривалої стабільності, розробки екологічно безпечних та біосумісних компонентів, а також масштабування методів виготовлення. Вирішення цих завдань можливе шляхом міждисциплінарної інтеграції досягнень хімії поверхні, матеріалознавства, нанотехнологій та інженерії.

Таким чином, РІП мають високий потенціал для впровадження в широке коло галузей — від енергетики та транспорту до біомедицини й екологічних технологій — що зумовлює актуальність подальших фундаментальних і прикладних досліджень у цій сфері.

### Л і т е р а т у р а

- Widom B. Capillarity and Wetting Phenomena: Drops, Bubbles, Pearls, Waves Capillarity and Wetting Phenomena: Drops, Bubbles, Pearls, Waves , Pierre-Gilles de Gennes , Françoise Brochard-Wyart, and David Quéré (translated from French by Axel Reisinger) Springer-Verlag, New York, 2004. ISBN 0-387-00592-7. Physics Today. 2004. Vol. 57, no. 12. P. 66–67. URL: <https://doi.org/10.1063/1.1878340>.
- Bhushan B., Jung Y. C. Natural and biomimetic artificial surfaces for superhydrophobicity, self-cleaning, low adhesion, and drag reduction. Progress in Materials Science. 2011. Vol. 56, no. 1. P. 1–108. URL: <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2010.04.003>.
- Quéré D. Wetting and Roughness. Annual Review of Materials Research. 2008. Vol. 38, no. 1. P. 71–99. URL: <https://doi.org/10.1146/annurev.matsci.38.060407.132434>.
- Richard D., Clanet C., Quéré D. Contact time of a bouncing drop. Nature. 2002. Vol. 417, no. 6891. P. 811. URL: <https://doi.org/10.1038/417811a>.
- Bioinspired self-repairing slippery surfaces with pressure-stable omniphobicity / T.-S. Wong et al. Nature. 2011. Vol. 477, no. 7365. P. 443–447. URL: <https://doi.org/10.1038/nature10447>.
- Liquid-infused structured surfaces with exceptional anti-biofouling performance / A. K. Epstein et al. Proceedings of the National Academy of Sciences. 2012. Vol. 109, no. 33. P. 13182–13187. URL: <https://doi.org/10.1073/pnas.1201973109>.
- Designing Liquid-Infused Surfaces for Medical Applications: A Review / C. Howell et al. Advanced Materials. 2018. Vol. 30, no. 50. P. 1802724. URL: <https://doi.org/10.1002/adma.201802724>.
- III. An essay on the cohesion of fluids. Philosophical transactions of the royal society of london. 1805. Vol. 95. P. 65–87. URL: <https://doi.org/10.1098/rstl.1805.0005>.
- Contact angle, wettability, and adhesion / ed. by F. M. Fowkes. WASHINGTON, D.C. : AMERICAN CHEMICAL SOCIETY, 1964. URL: <https://doi.org/10.1021/ba-1964-0043>.
- Owens D. K., Wendt R. C. Estimation of the surface free energy of polymers. Journal of applied polymer science. 1969. Vol. 13, no. 8. P. 1741–1747. URL: <https://doi.org/10.1002/app.1969.070130815>.
- Van Oss C. J., Good R. J., Chaudhury M. K. Additive and nonadditive surface tension components and the interpretation of contact angles. Langmuir. 1988. Vol. 4, no. 4. P. 884–891. URL: <https://doi.org/10.1021/la00082a018>.
- Enhanced condensation on lubricant-impregnated nanotextured surfaces / S. Anand et al. ACS nano. 2012. Vol. 6, no. 11. P. 10122–10129. URL: <https://doi.org/10.1021/nn303867y>.
- Clean and effective construction of SLIPS from porous polymer surface prepared by supercritical CO2 foaming technology / C. Lv et al. Journal of cleaner production. 2024. P. 141398. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141398>.
- Biomimetic liquid infused surface based on nano-porous array: corrosion resistance for tin metal and self-healing property / Y. Wei et al. Colloids and surfaces A: physicochemical and engineering aspects. 2022. P. 130482. URL: <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2022.130482>.
- Silicon-Based superslippery/superhydrophilic striped surface for highly efficient fog harvesting / X. Ji et al. Materials. 2023. Vol. 16, no. 15. P. 5423. URL: <https://doi.org/10.3390/ma16155423>.
- Photoswitchable liquid-to-solid transition of azobenzene-decorated polysiloxanes / J. J. B. van der Tol et al. Advanced functional materials. 2023. URL: <https://doi.org/10.1002/adfm.202301246>.
- Wei C., Gendelman O., Jiang Y. A superhydrophobicity–slipperiness switchable surface with magneto- and thermo-responsive wires for repelling complex droplets. Langmuir. 2024. URL: <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.3c03556>.
- Durability of slippery liquid-infused surfaces: challenges and advances / D. Tripathi et al. Coatings. 2023. Vol. 13, no. 6. P. 1095. URL: <https://doi.org/10.3390/coatings13061095>.
- Accelerated thermo-catalytic degradation of perfluoropolyether (PFPE) lubricants for space applications / M. Gleischer et al. Lubricants. 2023. Vol. 11, no. 2. P. 81. URL: <https://doi.org/10.3390/lubricants11020081>.
- Slippery surface for enhancing surface robustness and chemical stability / S. Lv et al. Journal of materials science. 2023. URL: <https://doi.org/10.1007/s10853-023-08245-5>.
- Infusing paraffin-based lubricant into micro-/nanostructures for constructing slippery marine antifouling coatings / Z. Yang et al. Progress in organic coatings. 2023. Vol. 185. P. 107919. URL: <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2023.107919>.
- Designing impact resistance and robustness into slippery lubricant infused porous surfaces / V. Singh et al. Advanced materials. 2024. URL: <https://doi.org/10.1002/adma.202409818>.
- Responsive slippery membrane with high efficiency in oil-water separation and mechano-bactericidal performances / J. Xu et al. Journal of membrane science. 2024. P. 123597. URL: <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2024.123597>.

24. Ramanamane N., Pita M. Improved oil/water separation by employing packed-bed filtration of modified quartz particles. *Water*. 2025. Vol. 17, no. 9. P. 1339. URL: <https://doi.org/10.3390/w17091339>.
25. Prakash C. G. J., Prasanth R. Recent trends in fabrication of nepenthes inspired SLIPs: design strategies for self-healing efficient anti-icing surfaces. *Surfaces and interfaces*. 2020. Vol. 21. P. 100678. URL: <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2020.100678>.
26. Novel SLIPS based on the photo-thermal MOFs with enhanced anti-icing/de-icing properties / X. Fang et al. *RSC advances*. 2022. Vol. 12, no. 22. P. 13792–13796. URL: <https://doi.org/10.1039/d2ra02046g>.
27. Yaghoubi M., Parvini Ahmadi N., Yazdani S. Fabrication of slippery lubricant-infused porous surfaces of galvanized steel with durable anti-icing and anti-corrosion behavior. *Materials today communications*. 2025. Vol. 42. P. 111251. URL: <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2024.111251>.
28. Fabrication of slippery liquid-infused porous surfaces on magnesium alloys with durable anti-corrosion and anti-tribocorrosion properties / Q. Cai et al. *Colloids and surfaces A: physicochemical and engineering aspects*. 2023. P. 131549. URL: <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2023.131549>.

**Makovkyi D.P., Myronyuk O.V. Liquid-repellent infused surfaces: a review of current trends and prospects**

*The article presents a comprehensive overview of the current state of research in the field of liquid-infused surfaces (LIS), which represent a promising direction in the development of functional coatings with tunable wetting properties. Based on the analysis of recent literature, the key physicochemical principles underlying the formation of infused surfaces are considered, including the presence of a stable lubricant layer retained in a capillary-active porous or textured matrix, the surface energy of the solid substrate, and interfacial interaction mechanisms. The properties of liquid-infused surfaces (LIS) are compared with those of traditional superhydrophobic coatings, particularly in terms of durability, stability under aggressive conditions, as well as self-cleaning, anti-corrosion, and anti-icing performance.*

*The article systematizes modern approaches to the fabrication of LIS based on both hydrophobic and*

*hydrophilic textures with subsequent infusion of chemically compatible lubricants. Special attention is paid to the use of advanced materials such as polymers, nanostructured metal oxides, and biocompatible lubricating fluids that ensure both functionality and environmental safety of the coatings. The development of adaptive surfaces capable of dynamically altering their properties in response to external stimuli—such as light, temperature, or magnetic field—is also considered. The study highlights key challenges in ensuring mechanical, chemical, and thermal stability of LIS under real-world conditions, including freeze-thaw cycles, dynamic loads, and contact with aggressive liquids.*

*The study analyzes the current application areas of liquid-infused surfaces in modern technical and industrial systems, including anti-icing technologies, corrosion protection, biomedical devices, membrane-based liquid separation, microfluidic components, and low-adhesion coatings. It is shown that LIS possesses significant interdisciplinary potential for implementation in energy, environmental protection, transportation, medicine, and other sectors, provided that existing technical, technological, and environmental barriers are overcome. The prospects for further development of this innovative technology are summarized in the context of materials science, applied engineering, and sustainable manufacturing.*

**Keywords:** liquid-infused surfaces; wetting; anti-icing; corrosion protection;

**Маковський Денис Петрович** - аспірант хіміко-технологічного факультету, Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", [makovskiy.denis@lil.kpi.ua](mailto:makovskiy.denis@lil.kpi.ua).

**Миронюк Олексій Володимирович** - д.т.н., доцент, завідувач кафедри хімічної технології композиційних матеріалів хіміко-технологічного факультету, Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", [o.myronyuk@kpi.ua](mailto:o.myronyuk@kpi.ua).

Стаття подана 20.05.2025.

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-291-5-74-87>

УДК 662.758

## ВИЗНАЧЕННЯ МОЖЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ХОЛОДНОЇ ПЛАЗМИ ДЛЯ ОКИСЛЕННЯ АТМОСФЕРНОГО АЗОТУ В ОКСИДИ НІТРОГЕНУ ТА ВПЛИВУ СИЛИ СТРУМУ ЧЕРЕЗ УСТАНОВКУ НА ПРОЦЕС

Слободянюк В.П., Кудрявцев С.О., Целіщев О.Б., Лорія М.Г.

## DETERMINATION OF THE POSSIBILITY OF USING COLD PLASMA FOR THE OXIDATION OF ATMOSPHERIC NITROGEN INTO NITROGEN OXIDES AND THE INFLUENCE OF ACTIVATING SUBSTANCES ON THE PROCESS

Slobodyanyuk V.P., Kudryavtsev S.O., Tselishchev O.B., Loria M.G.

Об'єктом дослідження є процес окислення атмосферного азоту в оксиди нітрогену. Окислення атмосферного азоту з метою отримання нітратної кислоти, є важливими для розробки нових методів зв'язування атмосферного азоту та активації метану, які є фундаментальними проблемами в галузі хімічної науки і технології. Проведено дослідження процесу окиснення молекулярного азоту та залежність вмісту оксидів нітрогену від сили току через установку з електродугувим генератором низькотемпературної плазми.

Для підтвердження гіпотези було здійснено квантово-хімічні дослідження реакційної активності нітратної кислоти та продуктів її розпаду. На початковому етапі проведено квантово-хімічні розрахунки методом DFT для визначення електронної структури та термодинамічних параметрів основного стану нітратної кислоти та трьох її відомих ізомерів.

Для впровадження процесу отримання нітратної кислоти з атмосферного повітря за допомогою репродуктивної технології, запропоновано конструкція реактора для отримання оксидів нітрогену шляхом прямого окиснення азоту в потоці холодної плазми. При цьому було запропоновано використання ефекту отримання оксидів азоту в повітряній суміші з парами азотної кислоти та при термічному розкладанні перекису нітрогену з азотом атмосферного повітря. Встановлено ефективність використання холодної плазми для окиснення атмосферного азоту, що підтверджується отриманими залежностями. Виявлено вплив сили струму через установку в присутності перекису водню та спиртів як активаторів процесу окислення атмосферного азоту у високоенергетичному середовищі.

Дослідження показали, що при збільшенні сили току через установку кількість оксидів азоту збільшується для усіх речовин активаторів в 2 - 8 разів.

Виявлено вплив вмісту оксидів нітрогену від сили току через установку з електродугувим генератором низькотемпературної плазми. Визначено, що при порівнянні речовин-активаторів, які при своєму розкладанні здатні утворювати ОН-радикали, саме перекис водню є найбільш перспективною речовиною-активатором для здійснення процесу окислення атмосферного азоту в потоці плазми.

**Ключові слова:** молекулярний азот, пряме окислення, холодна плазма, оксиди нітрогену, лазматрон, перекис водню.

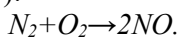
**1. Вступ.** Аміак є одним із ключових продуктів хімічної промисловості, щорічне виробництво якого сягає мільйонів тонн, відносячись до великотоннажних хімічних процесів. Технологія синтезу аміаку з елементарних речовин є сучасним способом фіксації атмосферного азоту, спрямованим на забезпечення потреб людства в азотовмісних сполуках. Завдяки цьому аміак слугує основною проміжною сировиною для виробництва майже всіх інших сполук зв'язаного азоту, зокрема азотної кислоти, її солей та добрив.

На глобальному рівні близько 80 % аміаку використовується для виготовлення мінеральних добрив. Крім того, аміак широко застосовується у виробництві полімерних

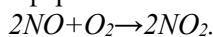
матеріалів, таких як поліаміди, поліуретани, поліакрилонітрил тощо. Нітрування органічних речовин азотною кислотою (наприклад, толуолу, фенолу, бензолу, целюлози чи гліцерину) дозволяє отримувати їх нітропохідні. Ці сполуки використовуються як вибухові речовини (нітробензол, тротил, піроксилін, амоніти) або напівпродукти для синтезу барвників, зокрема аніліну. Зважаючи на високий попит на продукти зв'язаного азоту, особливо азотні добрива, світове виробництво аміаку за обсягами поступається лише виробництву сірчаної кислоти та кисню.

Окиснення атмосферного азоту є важливим процесом у хімії атмосфери, який впливає на формування різних сполук азоту. Атмосферний азот ( $N_2$ ) окислюється до різних оксидів азоту, таких як  $NO$ ,  $NO_2$ ,  $N_2O$  та інших. Основні процеси окиснення азоту включають:

Термічне окиснення: При високих температурах (понад  $1000\text{ }^\circ\text{C}$ ) молекули азоту й кисню реагують з утворенням оксиду азоту ( $NO$ ):



Окиснення в двигунах внутрішнього згоряння: Високі температури в двигунах автомобілів сприяють утворенню  $NO$ , який потім може перетворюватися на  $NO_2$  в атмосфері:



Окиснення під дією блискавок: Блискавки також створюють високу температуру, яка сприяє окисненню азоту.

Деякі мікроорганізми здатні окиснювати азот, зокрема денітрифікуючі бактерії, які перетворюють  $NO_3^-$  в газоподібний  $N_2O$  або  $N_2$ .

Оксиди азоту ( $NO_x$ ) є важливими проміжними речовинами в атмосферних хімічних реакціях, які можуть призводити до формування тропосферного озону і кислотних дощів, а також мати вплив на здоров'я людей та довкілля.

Проблема фіксації азоту є однією з ключових у природних і сільськогосподарських екосистемах. Азот ( $N_2$ ) в атмосфері дуже стабільний і не доступний для більшості живих організмів у такій формі. Фіксація азоту – це процес перетворення атмосферного азоту в біологічно доступні форми, такі як аміак ( $NH_3$ ), нітрати ( $NO_3^-$ ) або амоній ( $NH_4^+$ ). Проблема фіксації азоту полягає в перетворенні атмосферного азоту в сполуки з нітрогеном, які можуть бути засвоєні рослинами безпосередньо або через попередні, відносно прості хімічні перетворення. Це визначається як життєва

проблема для людства, оскільки успішне вирішення цього завдання дозволяє в значній мірі вирішувати проблему глобального харчування, особливо у зв'язку із постійним зростанням світового населення. Сполуки азоту активно застосовуються у промисловості для виготовлення різноманітних матеріалів, таких як проміжні продукти, барвники, пластмаси, хімічні волокна та лікарські препарати. Вони також відіграють ключову роль у створенні вибухових речовин і запалювальних засобів.

Можна зробити висновок, що розробка та дослідження технологічних методів фіксації атмосферного азоту є важливими для розвитку хімічної промисловості, зміцнення обороноздатності країни та забезпечення повсякденних потреб населення.

Тому дослідження, присвячені розробці технології окислення атмосферного азоту в оксиди нітрогену, є актуальними.

**2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми.** Молекулярний азот, що міститься в повітрі, викликає особливий інтерес як сировина. Цей ресурс практично невичерпний, доступний у будь-якій точці земної кулі та має стабільні характеристики, на відміну від викопних ресурсів. Саме тому науковці та винахідники вже багато років зосереджені на вирішенні однієї з ключових задач сучасної науки – прямому окисненню атмосферного азоту. У природних умовах цей процес відбувається під час грозових розрядів блискавки та у верхніх шарах атмосфери під впливом ультрафіолетового випромінювання сонця.

У роботі [1] теоретично обґрунтовано можливість отримання нітратної кислоти через пряме окиснення атмосферного азоту за участю перекису водню та нітратної кислоти (метод Захарова). Однак технічна реалізація цього підходу є надзвичайно складною. Через це метод досі не був успішно впроваджений навіть у лабораторних умовах.

У роботах [2, 3] встановлено, що одним із найбільш перспективних методів промислового впровадження процесу прямого окиснення атмосферного азоту є метод Караваєва. Він базується на унікальних властивостях нітратної кислоти та забезпечує до 60 % підвищення виходу оксидів азоту. Водночас метод має певні недоліки: процес відбувається при високій температурі близько  $1050\text{ K}$ , характеризується вузьким температурним діапазоном для реалізації та вимагає складного обладнання. Через ці обмеження метод Караваєва досі не

набув широкого застосування у промислових масштабах.

У роботі [4] досліджено процес прямого окиснення аміаку до оксиду нітрогену, який характеризується надзвичайно швидким, високоекзотермічним і нерівноважним механізмом. Формування NO значною мірою залежить від високої температури (приблизно 1100–1300 К) та підвищеного тиску. Проте високотемпературний каталітичний процес може спричинити механічні пошкодження каталітичних решіток. До того ж утворення оксидів платини на поверхні каталізатора через недостатнє змішування аміаку з повітрям, а також нерівномірний розподіл газового потоку по каталізатору.

У дослідженнях [5] детально описано єдиний наразі надійно працюючий метод отримання оксидів азоту шляхом каталітичного окиснення аміаку. Цей підхід передбачає використання природного газу для зв'язування атмосферного азоту, що фактично перетворює його на витратний ресурс у процесі виробництва нітратної кислоти. Проте метод має суттєві недоліки: високий рівень викидів парникових газів та значна енергоємність процесу. У результаті це значно підвищує собівартість отриманої нітратної кислоти.

У роботі [6] дослідники встановили, що ін'єкція нітратної кислоти в атмосферу при температурі 758–1173 К сприяє збільшенню утворення оксидів нітрогену на 60 %. Це дозволяє припустити, що в продуктах термолізу нітратної кислоти можуть формуватися радикали, здатні активувати та окислювати молекулярний азот. Отримані результати свідчать про те, що високоенергетичними сполуками, які утворюються в продуктах швидкого термолізу нітратної кислоти, можуть бути оксо-ізомери. Таким чином, зроблені висновки є логічним поясненням експериментів, описаних у роботі [7] де досліджувалося автокаталітичне використання парів нітратної кислоти для активації молекулярного азоту. Проте ці дослідження не отримали подальшого розвитку.

У роботі [8] описано традиційний метод, який демонструє ефективність, проте має кілька значних обмежень, що впливають на загальну продуктивність. Перш за все, близько 30 % вартості виробництва нітратної кислоти припадає на аміак, що використовується як сировина, що обмежує економічну ефективність і створює екологічні виклики. Іншим суттєвим недоліком є втрата металів платинової групи

через випаровування та ерозію. Крім того, процес ускладнюється формуванням конденсату під час отримання  $\text{HNO}_3$ , а також потребує значних капіталовкладень і операційних витрат через велику кількість технологічних етапів.

У роботі [9] теоретично обґрунтовано та експериментально реалізовано метод прямого окиснення атмосферного азоту з утворенням закису азоту. Процес здійснюється шляхом реакції продуктів термічного розкладання перекису водню з азотом атмосферного повітря при температурі близько 800 К, і відомий як метод Нагієва. Основний недолік цього методу полягає в його обмеженій застосовності. Причиною цього можуть бути об'єктивні труднощі, пов'язані з тим, що закис азоту є майже таким самим інертним, як і молекулярний азот, і, по-друге, тим, що він не утворює кислот, оскільки не належить до кислотних оксидів.

Все це дозволяє стверджувати, що доцільним є проведення дослідження, які спрямовано на пряме окиснення атмосферного азоту з метою отримання нітратної кислоти, є важливими та актуальними. Результати розглянутих досліджень можуть стати відправною точкою для розробки нових методів зв'язування атмосферного азоту та активації метану, які є фундаментальними проблемами в галузі хімічної науки і технології.

**3. Мета за задачі дослідження.** Метою роботи є дослідження можливості використання холодної плазми для створення умов окиснення атмосферного азоту. Це дозволить здійснити процес перетворення атмосферного азоту на оксиди нітрогену в потоці холодної плазми.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати такі завдання:

– обґрунтувати ефективність застосування холодної плазми для окиснення атмосферного азоту;

– дослідити вплив сили струму через установку як фактора активації процесу окиснення азоту в умовах високоенергетичного поля.

#### **4. Матеріали та методи досліджень.**

##### **4. 1. Об'єкт та гіпотеза дослідження.**

Об'єктом дослідження є процес окиснення атмосферного азоту в оксиди нітрогену.

Предметом дослідження є окиснення атмосферного азоту в оксиди нітрогену.

Передумови запропонованого процесу полягають в наступному. В умовах лабораторії атомарний азот може бути отриманий за допомогою високочастотного електричного

розряду. Атомарний азот виявляє значно вищу активність порівняно з атмосферним азотом. Цей вид азоту може взаємодіяти з сіркою, фосфором, миш'яком, а також з різними металами, такими як літій, магній, ртуть і інші.

Навіть при температурі, що перевищує 3300 К, рівень термічної дисоціації  $N_2$  становить лише 0,1 %. При температурі понад 5300 К цей рівень зростає до 2–3 % при атмосферному тиску.

Для підтвердження гіпотези було здійснено квантово-хімічні дослідження реакційної активності нітратної кислоти та продуктів її розпаду. Відомо, що не лише нітратна кислота, а й інші сполуки нітрогену, такі як  $N_2O_5$ ,  $NO_2$  та  $N_2O_3$ , є потужними окисниками. Вивчення окиснювальних властивостей нітрогенвмісних сполук із застосуванням сучасних квантово-хімічних підходів описано в роботах [3–5]. На початковому етапі проведено квантово-хімічні розрахунки методом DFT для визначення електронної структури та термодинамічних параметрів основного стану нітратної кислоти та трьох її відомих ізомерів [4]. Результати розрахунків представлено на рис. 1.

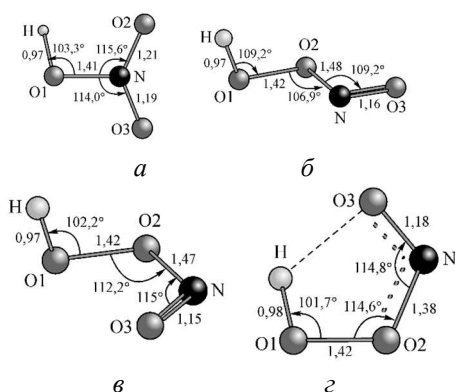


Рис. 1. Дані квантово-хімічного V3LYP/6-311++G(3df,3pd) розрахунку геометричної структури: *a* – основного стану нітратної кислоти  $HNO_3$  та трьох її ізомерів у формі пероксиазотистої кислоти (довжини зв'язків у Å, кути у градусах): *b* – транс- $ONOOH$ ; *в* – цис- неплоска  $ONOOH$ ; *г* – цис- плоска  $ONOOH$

Геометрія (*a*) і (*г*) структур характеризується симетрією  $C_s$  (атоми знаходяться в одній площині). В структурах (*б*) і (*в*) кінцевий атом гідрогену  $H$  не лежить у площині  $O_1O_2NO_3$  – (симетрія  $C_1$ ): розраховані торсіальні кути:  $\tau_{HO_1O_2N} = 98,7^\circ$  і  $95,0^\circ$  – відповідно.

Наведені розрахунки показують, що найбільш стабільною структурою є *цис*-ізомер

$ONOOH$ , який стабілізується у вигляді двох структур. Найбільш стійким станом пероксиазотистої кислоти є плоска *цис*-геометрія.

В пошуках «активних» форм нітратної кислоти, які здатні взаємодіяти з субстратом як за механізмом «прямого», так і за механізмом «непрямого» окиснення, були проведені квантово-хімічні розрахунки п'яти нових ізомерів нітратної кислоти, так званих *оксо*-ізомерів  $OON(H)O$  [4]. На рис. 2 надано результати V3LYP/6-311++G(3df,3pd) розрахунків.

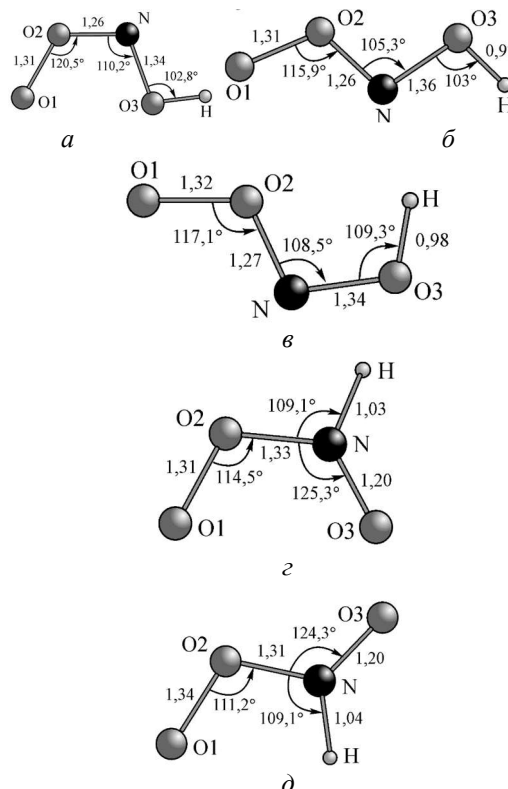


Рис. 2. Дані квантово-хімічного V3LYP/6-311++G(3df,3pd) розрахунку геометричної структури п'яти нових *оксо*-ізомерів нітратної кислоти (довжини зв'язків у Å, кути у градусах): *a* – ізомерів у формі пероксиазотистої кислоти; *б* – транс- $ONOOH$ ; *в* – *оксо* – неплоска  $ONOOH$ ; *г* – *оксо* – плоска  $ONOOH$

*Оксо*-ізомери  $OON(H)O$  відзначаються наявністю кінцевої пероксидної групи в структурній формулі  $O-O-X$ , що дозволяє порівнювати їх із пероксидними радикалами типу  $OOR$ . Ці ізомери потенційно мають високу реакційну здатність у процесах окиснення. У зв'язку з цим було проведено дослідження їхньої участі в реальних реакціях окиснення різних субстратів, наприклад, молекулярного азоту ( $N_2$ ). На рис. 3 показана структура

перехідного стану для активації молекули азоту в реакції.

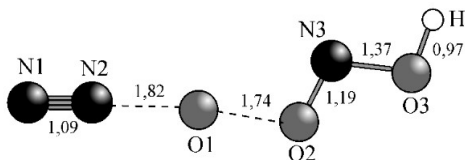
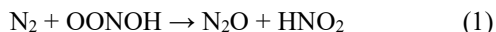


Рис. 3. Дані квантово-хімічного B3LYP/6-311++G(3df,3pd) розрахунку перехідного стану активації молекулярного азоту в реакції:  $\text{N}_2 + \text{OONO} \rightarrow \text{N}_2\text{O} + \text{HNO}_2$ . Довжини зв'язків наведені у Å

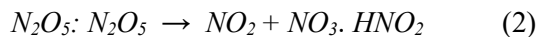
Розрахована енергія активації цього процесу складає  $E_a = +100,8$  кДж, теплота реакції  $\Delta_r H_{298}^\circ = -174,8$  кДж і ентропія реакції  $\Delta_r S_{298}^\circ = +5,55$  Дж/К (табл. 3) вказують на термодинамічну можливість самовільного перебігу реакції окиснення молекулярного азоту  $\text{N} \equiv \text{N}$  при температурах  $\sim 1000$  К, тому що енергія Гіббса реакції має від'ємне значення ( $\Delta_r G_{1000} \sim -180$  кДж). Енергетичний бар'єр реакції  $E_a \approx 100$  кДж, також можна подолати при температурі  $\sim 1000$  К.

Результати даного теоретичного дослідження показують, що в продуктах термолізу нітратної кислоти утворюються високоенергетичні сполуки (оксо-ізомери нітратної кислоти), які здатні до активації та окиснення молекулярного азоту  $\text{N}_2$ . В експериментальних досліджах Караваєва [10]

показано, що вприскування нітратної кислоти у повітряну суміш при температурах 758–1173 К приводить до приросту оксидів нітрогену.

Відомо [1], що концентрована нітратна кислота розкладається за кімнатної температури у відповідності до сумарної реакції:  $4\text{HNO}_3 \leftrightarrow 4\text{NO}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + \text{O}_2$ .

При інтенсивному нагріванні розкладання  $\text{HNO}_3$  відповідає сумарній реакції:  $2\text{HNO}_3 \leftrightarrow \text{N}_2\text{O}_5 + \text{H}_2\text{O}$ , яка повністю завершується при 531–533 К. Експериментальна енергія активації термічного розкладання  $\text{HNO}_3$  знаходиться в межах 134–155 кДж/моль та визначається реакцією розпаду пентаоксиду нітрогену:



Предметом подальшого квантово-хімічного дослідження стали  $\text{N}_2\text{O}_5$ ,  $\text{NO}_2$  та  $\text{NO}_3$ , як

продукти термічного розкладання нітратної кислоти.

В роботі [7] проведені розрахунки геометричних параметрів молекулярних структур пентаоксиду нітрогену, рис. 4.

Розраховані в [7] ІЧ-спектри наведених структур свідчать про існування пентаоксиду нітрогену в газовому стані у вигляді структур (б) і (в) (рис. 4).

Диоксид нітрогену  $\text{NO}_2$  є проміжним продуктом у виробництві нітратної кислоти, можливим продуктом її термічного розкладу, тому представляє інтерес як окисник в газовій фазі для речовин, що важко окислюються.

Експериментальні роботи по прямому окисненню хімічно інертного молекулярного азоту парою нітратної кислоти при 753–1173 К були проведені Караваєвим [5].

Метою експериментів було підтвердження можливості реалізації процесу окиснення молекулярного азоту парою нітратної кислоти. Було проведено три серії експериментів: (1) в потоці азоту, (2) в потоці повітря, (3) в потоці суміші азоту та гелію. Газо-носії насичувались парою нітратної кислоти в резервуарі при температурі 290–390 К. Після насичення парами  $\text{HNO}_3$  реакційна суміш підігрівалась до 900 К. Процес окиснення азоту контролювався відносним збільшенням вмісту оксидів нітрогену в газовій фазі після пропускання крізь каталізатор ( $T=1000\text{K}$ ) у порівнянні з вмістом  $\text{NO}_x$  до взаємодії з каталізатором. Вимірювання вмісту оксидів нітрогену проводилося трьома методиками:

а) методом ІЧ-спектроскопії за зміною полос поглинання;

б) за даними матеріального балансу по нітрогену;

в) за даними по окисненню ізоотопу азоту  $^{15}\text{N}_2$ .

У всіх експериментах з використанням повітря, природного  $^{14}\text{N}_2$  та важкого ізоотопу  $^{15}\text{N}_2$  спостерігається приріст кількості  $\text{NO}_x$  в межах 24–55 % [6]. Похибка у визначенні вмісту сполук нітрогену не перевищувала 7 %. Оксиди нітрогену  $\text{NO}_x$  оброблялися промивним розчином гідроген пероксиду [10] з одержанням нітратної кислоти:  $6\text{NO}_2 + 3\text{H}_2\text{O}_2 \leftrightarrow 6\text{HNO}_3$ .

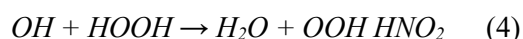
В описаних експериментах Караваєва [7] закис нітрогену  $\text{N}_2\text{O}$  у складі газової суміші після взаємодії з каталізатором виявлено не було.

Термодинамічні дослідження процесу прямого окиснення  $\text{N}_2$  парою нітратної кислоти були проведені авторами [10]. Всі

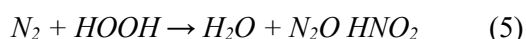
запропоновані реакції є ендотермічними, що пояснює позитивний вплив підвищення температури. Розрахунки ізобарно-ізотермічного потенціалу запропонованих реакцій показують, що зміна знаку потенціалу відбувається за температур 800–1000 К. Тобто реакції мають термодинамічну «заборону» і активуються тільки високими температурами. Термодинамічний підхід не розкриває механізму реакції та не пояснює дані авторів по кількісному приросту кисневих сполук (від 20 до 80 %).

Теоретичне обґрунтування та можливі механізми реалізації процесу прямого окиснення молекулярного азоту парою нітратної кислоти та продуктами її термолізу детально досліджені Захаровим [5]. На підставі проведених квантово-хімічних розрахунків з урахуванням даних експериментальних досліджень була запропонована теоретична концепція активації молекулярного азоту  $N_2$  з подальшим перетворенням в  $HNO_3$  [10]. Запропонована підтверджує можливість 50 % приросту  $NO_x$  і є принципово новим поглядом на механізм прямого окиснення молекулярного азоту парою нітратної кислоти та продуктами її термічного розкладання.

Сильні окисні властивості має гідроген пероксид. Вперше експерименти по зв'язуванню нітрогену в  $N_2O$  через взаємодію з гідроген пероксидом  $HOOH$  [4]. Процес окиснення був реалізований в газовій фазі за умов атмосферного тиску і середніх температур ( $\approx 500$  °C). Мас-спектральний аналіз кінцевих продуктів реакції показав наявність  $H_2O$ ,  $O_2$  і  $N_2O$ . Особливістю реалізованого процесу є наявність в реакційній газовій фазі активних  $OH$  і  $OOH$  радикалів, механізм утворення яких включає термічний розклад гідроген пероксиду:

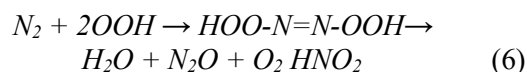


В умовах експерименту співвідношення концентрацій  $[OOH]/[OH]$  складало  $10^3 \div 10^7$ . За думкою авторів [9, 10] сумарне рівняння процесу зв'язування молекулярного  $N_2$  має вигляд:



Це рівняння не розкриває механізму реакції і не пояснює наявність молекулярного кисню в продуктах реакції.

Квантово-хімічні докази можливості реалізації процесу (ефект Нагієва) представлені в роботах Захарова [7]. На підставі квантово-хімічних розрахунків гідроген пероксиду ( $HOOH$ ) і продуктів його розкладу ( $OH$ ,  $OOH$ ) знайдена структура стабільного молекулярного інтермедіату ( $HOO-N=N-OOH$ ) реакції взаємодії молекулярного азоту з гідропероксидним радикалом  $OOH$  і запропонована така схема процесу:



Теоретична концепція активації стійкого до окиснення  $N_2$  гідроген пероксидом [10].

Аналіз результатів квантово-хімічних розрахунків Захарова І.І. та експериментальних досліджень Караваєва і Нагієва дозволяє запропонувати схему, що базується на поєднанні процесів окиснення молекулярного азоту продуктами термічного розкладу нітратної кислоти (ефект Караваєва) і термічного розкладу гідроген пероксиду (ефект Нагієва).

**4. 2. Обґрунтування вибору методів дослідження.** Впровадження технології отримання нітратної кислоти за методом Захарова, яка дозволяє отримувати цей продукт без використання аміаку через етап конверсії природного газу, має потенціал зменшити викиди оксидів вуглецю та тепла в навколишнє середовище. Це сприятиме значному покращенню екологічних показників виробництва. Для реалізації цієї технології необхідно провести процес прямого окислення атмосферного азоту в оксиди нітрогену. В ході досліджень вивчено процес окислення атмосферного азоту в холодній плазмі за участю речовин-активаторів. Тому було розроблено лабораторну установку отримання оксидів нітрогену шляхом прямого окиснення атмосферного азоту в потоці холодної плазми. На основі результатів квантово-хімічних розрахунків за методом Захарова та експериментальних досліджень ефектів Караваєва і Нагієва висунута схема використання процесу окиснення молекулярного азоту шляхом використання продуктів термічного розкладання нітратної кислоти та гідроген пероксиду. Виявлено, що умови, наближені до нормальних, демонструють низьку ефективність перетворення атмосферного азоту в діоксид нітрогену та нітратну кислоту, що становить

тисячні долі відсотка. Запропоновано спробу впровадження цих процесів в область високоенергетичної холодної плазми.

Серед сучасних технічних пристроїв, які випускаються серійно, забезпечують стійку роботу та здатні формувати високоенергетичне поле для окислення атмосферного азоту слід виділити плазматрони та котушки Тесла. В цієї роботі саме плазматрон «Горинич» запропоновано використати в якості джерела створення плазми для побудови лабораторних установок з метою порівняння ефективності використання різних умов формування плазми та ефективності різних речовин-активаторів. В цьому пристрої закладено можливість регулювати напругу та силу струму. Установки для отримання нітратної кислоти, що розробляються, мають відповідати декільком ключовим принципам.

Впровадження технології отримання нітратної кислоти за методом Захарова, що дозволяє виробляти цей продукт без використання аміаку та етапу конверсії природного газу, має потенціал значно знизити викиди оксидів вуглецю та теплове навантаження на навколишнє середовище. Це забезпечить суттєве покращення екологічних характеристик виробництва. Основою технології є процес прямого окиснення атмосферного азоту в оксиди нітрогену.

Дослідження охоплювали вивчення окиснення атмосферного азоту в умовах холодної плазми за участю речовин-активаторів. Для цього було створено лабораторну установку, що дозволяє отримувати оксиди нітрогену шляхом прямого окиснення атмосферного азоту в потоці холодної плазми. На основі квантово-хімічних розрахунків за методом Захарова та експериментальних даних щодо ефектів Каравасва і Нагієва була запропонована схема, яка передбачає використання продуктів термічного розкладання нітратної кислоти та гідроген пероксиду для активації процесу окиснення молекулярного азоту.

Досліди показали, що за умов, близьких до нормальних, ефективність перетворення атмосферного азоту в діоксид нітрогену та нітратну кислоту є вкрай низькою — лише тисячні частки відсотка. У зв'язку з цим запропоновано застосування високоенергетичної холодної плазми.

Серед сучасних серійних технічних пристроїв, здатних забезпечити стабільне створення високоенергетичного поля для

окиснення атмосферного азоту, слід виділити плазматрони та котушки Тесла. У рамках даної роботи як джерело плазми було обрано плазматрон «Горинич». Він дозволяє регулювати напругу та силу струму, що робить його оптимальним для порівняння ефективності різних умов формування плазми та дії різних речовин-активаторів.

Розроблені установки для отримання нітратної кислоти мають відповідати таким ключовим принципам:

- забезпечення концентрації активованих частинок  $NO_3^*$

- забезпечення концентрації активованих частинок  $OH$  (забезпечує реалізацію реакції (12);

- можливість опромінення реакційної зони при  $\lambda=662$  нм;

- наявність в реакційній зоні оксидів нітрогену  $N_2O_5$ ,  $NO_2$ .

Данні принципи можна реалізувати різними технічними рішеннями. Найбільш доцільно перевіряти життєздатність таких технічних рішень – зміною варіантів конструктивного оформлення установки.

**4. 3. Лабораторна установка та умови проведення експериментів.** Лабораторна установка побудовані таким чином, щоб забезпечити максимально просту експлуатацію, придатність до ремонту, можливість варіювання технологічних параметрів (швидкість руху повітря через реактор, концентрація ініціаторів в повітрі, параметри генераторів плазми та розряду).

Перші варіанти лабораторних установок передбачають виконання лабораторного реактора з кварцового скла, комунікацій – з пластикових водопровідних труб. Відведення тепла від газів в цих установках не передбачено, тому установки є робочими тільки за температур не вище  $100$  °С.

Основними елементами лабораторних установок є: вузол генерації активованих частинок (на сьогодні це вирішується за допомогою плазмогенератору та котушки Тесла), реактор, абсорбер-доокиснювач оксидів нітрогену.

Установка можуть функціонувати в двох режимах: під розрядженням, коли рух повітря забезпечується вакуумним насосом, або під тиском, завдяки подачі повітря компресором.

Витрата повітря визначається шляхом вимірювання об'єму газів, що накопичуються в ємності протягом певного часу в стабільному

режимі, з подальшим перерахунком на об'ємну швидкість.

Установка (рис. 4), складається з основних блоків: плазмогенератор, реакторна частина, блок фіксації оксидів нітрогену.

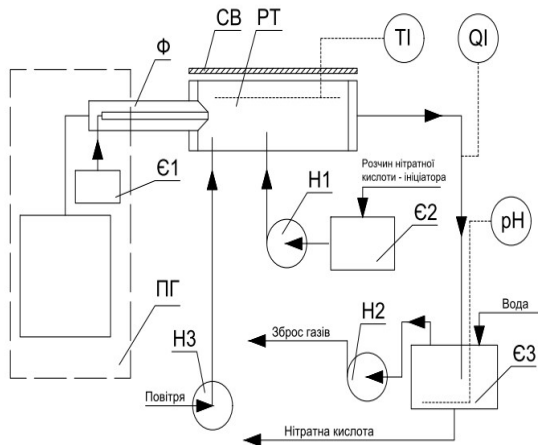


Рис. 4. Установка для отримання нітратної кислоти через керовану активацію атмосферного азоту з генерацією активованих частинок плазмогенератором: плазмогенератор (ПГ), блок дозування рідини (Є1), пристрій дозування (Ф), вузол реактору (РТ), вакуумний насос (Н2), насос (Н1), ємність (Є2), пірометр (ТІ), хроматограф (QI), абсорбер (Є3), форсунка (Ф)

Елементами плазмогенератора (ПГ), які мають основну роль у процесі синтезу нітратної кислоти, є блок дозування рідини (Є1), він є генератором активних частинок (радикали, іони, атоми тощо), які потрапляють в зону розряду. У Якості рідини використовується вода, одноатомні спирти, етери, перекис водню або нітратна кислота. Розряд формується на катоді, дозування рідини здійснюється через пристрій дозування (Ф), його конструкція визначається довжиною, силою розряду та обсягом рідини, що подається у плазмове поле.

Вузол реактору (РТ) складається з кварцової трубки, куди надходить плазмований розряд, де відбуваються іонізація і термічна дисоціація речовини-активатора. Повітря подається через окремий вхід, витрата регулюється зміною тиску на вході у вакуумний насос (Н2). Кварцова трубка освітлюється лампою (СВ), яка генерує світлові хвилі довжиною  $662 \pm 10$  нм, що активують оксиди нітрогену і сприяють утворенню оксиду нітрогену (II).

В установці передбачено окремий вузол дозування води до реакторної зони з насосом (Н1) і ємністю (Є2). Ця вода використовується

для швидкого зниження температури в реакційній зоні за потреби. Крім того, насос може подавати розчини речовин-активаторів (нітратної кислоти або перекису водню), які при потраплянні в зону плазми генерують активні частинки, ініціюючи процес синтезу оксидів азоту з атмосферного азоту.

Температура контролюється уздовж реактора здійснюється пірометром (ТІ), а регулюється зміна кількості та швидкості руху повітря через реактор. Концентрація оксидів азоту в повітрі після реактора вимірюється хроматографом (QI) у безперервному режимі або газоаналізатором (ОКСИ-5М-5Н). Це дозволяє впливати на склад продуктів в одному експерименті шляхом зміни кількості речовини-активатора, температурного режиму та інтенсивності опромінення реактора.

Оксид нітрогену (II) окислюється до оксиду нітрогену (IV) при кімнатній температурі та абсорбується в абсорбері (Є3), утворюючи нітратну кислоту. Ефективність процесу оцінюється зміною рН розчину в абсорбері за допомогою рН-метра.

Рух повітря через установку забезпечується або вакуумним насосом (Н2), створюючи тиск нижчий за атмосферний, або компресором (Н3), підвищуючи тиск до рівня вище атмосферного. У першому випадку повітря надходить через щілини у форсунці (Ф).

Для лабораторних досліджень було зібрано установку, зображену на рис. 1. Параметри плазмогенератора налаштовувалися для забезпечення стабільного плазмового потоку: сила струму – 8,0 А, напруга – 170 В. Потік повітря через реакційний об'єм регулювався в межах 0–3000 л/год. Як рідина, пара якої формує плазму, використовували дистилат та рідини-активатори, здатні утворювати ОН-радикали при термічному розкладанні. У роботі застосовували етанол і перекис водню, а також інші стійкі до кислот і окисників матеріали для трубопроводів і плазмотрона.

## 5. Результати досліджень процесу окиснення молекулярного азоту в високоенергетичному полі плазмотрону.

### 5.1. Дослідження використання холодної плазми для окиснення атмосферного азоту при зміні сили току через установку.

За нульовий дослід було обрано окиснення атмосферного азоту в потоці плазми, яка формується паром дистилату. Параметри плазмогенератора: рідина – дистилат; сила току від 1 – 8,0 А; напруга 170 В.

Графічно залежності концентрації монооксиду нітрогену та оксиду нітрогену від сили току через установку окиснення атмосферного азоту наведено на рис. 5.

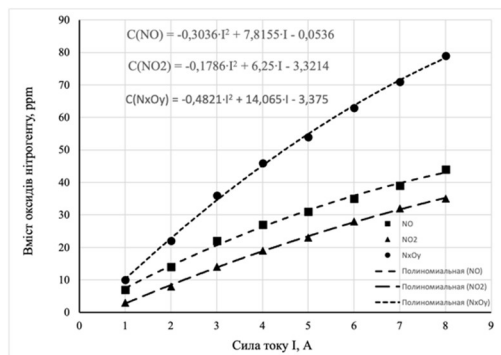


Рис. 5. Залежність вмісту оксидів нітрогену від сили току через установку (Лабораторна установка з електродуговим генератором низькотемпературної плазми (Параметри плазмогенератору: рідина – дистиллят; напруга 170 В; витрата повітря через сопло плазми 80 л/год)

Залежність концентрації оксиду нітрогену (II)  $C_{\text{NO}}$  від сили току  $I_1$  описується рівнянням 23, а залежність концентрації оксиду нітрогену (IV)  $C_{\text{NO}_2}$  від витрати повітря  $I_1$  описується рівнянням 24. Рівняння (7) та (8) описують поведінку системи в діапазоні сили току 1–8 А:

$$C_{\text{NO}} = -0,3036 \cdot I^2 + 7,8155 \cdot I - 0,0536 \quad (7)$$

$$C_{\text{NO}_2} = -0,1786 \cdot I^2 + 6,25 \cdot I - 3,3214. \quad (8)$$

В роботі серед методів математичної статистики було використано тільки усереднення шляхом знаходження середнього арифметичного значення в кожній точці експерименту. Загалом було проведено три дослідження з п'яти серій в кожному. При подальших дослідженнях, при збільшенні об'єму експериментальних даних буде доречно застосувати весь апарат математичної статистики для обробки експериментальних результатів.

З огляду отриманих залежностей, можна відмітити максимум концентрації оксиду нітрогену на рівні 80 ppm, силі току через установку від 1 до 8 А. Максимум концентрація діоксиду нітрогену при 8 А дещо менше, знаходиться на рівні 40 ppm.

**5. 2. Дослідження впливу перекису водню для окиснення атмосферного азоту при зміні сили току через установку.** Відомо, що перекис водню при термічному розкладенні

утворює два ОН- радикали. Експериментальним шляхом було встановлено, що використання 3 % розчину перекису водню в дистилляти в якості робочої рідини дозволяє отримати стабільний потік плазми. Результати досліджень окислення атмосферного азоту в потоці плазми пари дистиллят 97 % – перекис водню 3 % наведено на рис. 4.

В роботі було проведено низку досліджень, в яких визначався вплив концентрації перекис гідрогену в суміші, яка використовувалася при формуванні плазми. Експериментальним шляхом було встановлено, що оптимальним для формування потоку плазми є склад 97 % дистилляту – 3 % перекис гідрогену. Результати досліджень наведено та на рис. 6.

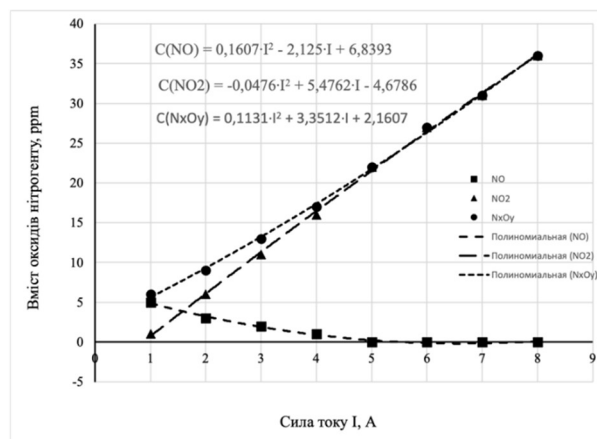


Рис. 6. Залежність вмісту оксидів нітрогену від сили току через установку (Лабораторна установка з електродуговим генератором низькотемпературної плазми (Параметри плазмогенератору: рідина – дистиллят+3 % перекис гідрогену; напруга 170 В; витрата повітря через сопло плазми 160 л/год)

Залежність концентрації оксиду нітрогену (II)  $C_{\text{NO}}$  від сили току  $I$  описується рівнянням (25), а залежність концентрації оксиду нітрогену (IV)  $C_{\text{NO}_2}$  від сили току  $I$  описується рівнянням (10). Рівняння (9) описує поведінку системи в діапазоні витрат повітря 1–6 А, а рівняння (26) описує поведінку системи в діапазоні витрат повітря 1–8 А:

$$C_{\text{NO}} = 0,1607 \cdot I^2 - 2,125 \cdot I + 6,8393, \quad (9)$$

$$C_{\text{NO}_2} = -0,0476 \cdot I^2 + 5,4762 \cdot I - 4,6786. \quad (10)$$

При аналізі залежності, можна навести, що наявність перекис гідрогену в парі, яка утворює

потік плазми та збільшення сили току приблизно в 5 разів збільшує кількість діоксидів нітрогену. Кількість оксидів нітрогену, що утворюються в реакторі зменшується до нуля при зростанні сили току.

Залежність вмісту оксидів нітрогену від сили току через установку (Лабораторна установка з електродуговим генератором низькотемпературної плазми (Параметри плазмогенератору: рідина – дистиллят+24 % етанол; напруга 170 В; витрата повітря через сопло плазми 80 л/год) зображено на рис. 7.

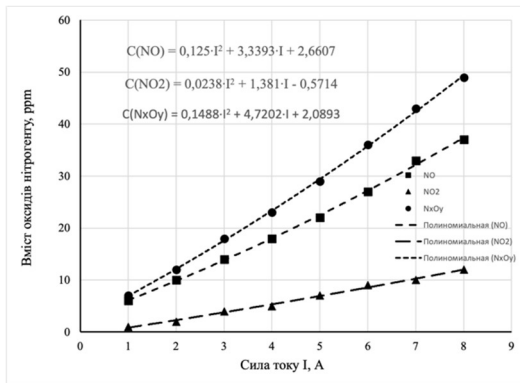


Рис. 7. Залежність вмісту оксидів нітрогену від сили току через установку (Лабораторна установка з електродуговим генератором низькотемпературної плазми (Параметри плазмогенератору: рідина – дистиллят+24 % етанол; напруга 170 В; витрата повітря через сопло плазми 80 л/год)

Залежність концентрації оксиду нітрогену (II)  $C_{NO}$  від сили току  $I$  описується рівнянням (27) а залежність концентрації оксиду нітрогену (IV)  $C_{NO_2}$  від сили току описується рівнянням (28). Рівняння (11) та (12) описує поведінку системи в діапазоні сили току 1–8 А:

$$C_{NO} = 0,125 \cdot I^2 + 3,3393 \cdot I + 2,6607, \quad (11)$$

$$C_{NO_2} = 0,0238 \cdot I^2 + 1,381 \cdot I - 0,5714. \quad (12)$$

При аналізі залежності, можна навести, що наявність 24 % етанолу в парі, яка утворює потік плазми та збільшення сили току приблизно в 2 рази збільшує кількість діоксидів нітрогену. Кількість оксидів нітрогену, що утворюються в реакторі збільшується в 10 разів при зростанні сили току.

Залежність швидкості утворення оксидів нітрогену від сили току через установку (Лабораторна установка з електродуговим генератором низькотемпературної плазми (Параметри плазмогенератору: напруга 170 В) надано на рис. 8.

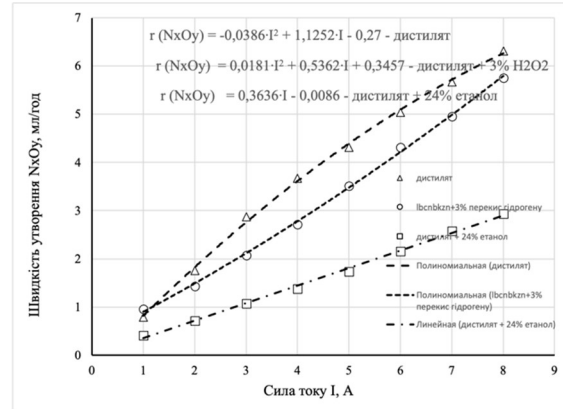


Рис. 8. Залежність швидкості утворення оксидів нітрогену від сили току через установку (Лабораторна установка з електродуговим генератором низькотемпературної плазми (Параметри плазмогенератору: напруга 170 В)

На рис. 8 наведено залежність швидкості утворення оксидів нітрогену  $NO_x$  від сили току через установку при використанні різних активаторів, яка показує, що дистиллят та етанол є значно ефективнішим джерелом радикалів ніж перекис водню.

Залежність швидкості утворення оксидів нітрогену  $NO_x$  від сили току при роботі плазмогенератору на дистилляті описується рівнянням (13), залежність оксидів нітрогену  $NO_x$  від сили току при використанні в якості активатору 24 % етанолу описується рівнянням (14), а залежність оксидів нітрогену  $NO_x$  від сили току при використанні в якості активатору 3 % перекису водню описується рівнянням (15):

$$r(NxOy) = -0,0386 \cdot I^2 + 1,1252 \cdot I - 0,27 - \text{дистиллят}, \quad (13)$$

$$r(NxOy) = 0,0181 \cdot I^2 + 0,5362 \cdot I + 0,3457 - \text{дистиллят} + 3\% \text{ H}_2\text{O}_2, \quad (14)$$

$$r(NxOy) = 0,3636 \cdot I - 0,0086 - \text{дистиллят} + 3\% \text{ перекис гідрогену}. \quad (15)$$

З графіку (рис. 6) залежності вмісту оксидів нітрогену від сили току через установку при використанні різних активаторів можна сказати, що процес утворення оксидів нітрогену в стабільному потоці плазми відбувався у всіх дослідах. Але найбільша досягнута концентрація оксидів нітрогену склала всього 80 ppm.

**6. Обговорення результатів дослідження окислення молекулярного азоту в плазмі та впливу сили струму через установку на процес.** Впровадження нової репродуктивної технології для виробництва нітратної кислоти пропонує інноваційний підхід, який дозволяє

отримувати кислоту без етапу синтезу аміаку шляхом конверсії природного газу.

Інноваційні підходи до репродуктивних технологій включає використання холодної плазми для прямого окислення атмосферного азоту, застосування активаторів та оптимізація електричних параметрів для покращення виходу реакції. На відміну від [8], де обґрунтовано метод прямого окиснення атмосферного азоту з утворенням закису азоту. Процес здійснюється шляхом реакції продуктів термічного розкладання перекису водню з азотом атмосферного повітря при температурі близько 800 К, але обмеженій застосування пов'язане з тим, що закис азоту є майже таким самим інертним, як і молекулярний азот, і, по-друге, тим, що він не утворює кислот, оскільки не належить до кислотних оксидів. Тому технологія використання холодної плазми спрямовано на покращення ефективності процесу, зменшення витрат та зниження шкоди довкіллю.

Аналіз проведених експериментів підтвердив утворення оксидів азоту в стабільному плазмовому потоці під час усіх досліджень. Встановлено, що кількість оксидів азоту залежить від кількох чинників, зокрема параметрів роботи плазмогенератора, складу рідини, що використовується в пальнику, та сили струму через установку. Водночас максимальна концентрація оксидів азоту виявилася обмеженою. На основі отриманих даних зроблено висновок, що лімітуючим етапом окислення атмосферного азоту є процес формування радикалів, тобто здатність плазмогенератора генерувати їх за заданих умов (рис. 5).

Аналіз результатів цього дослідження показує, що присутність етанолу в складі пари (рис. 6), яка утворює потік плазми та збільшення сили току приблизно в 2 рази збільшує кількість діоксидів нітрогену. Кількість оксидів нітрогену, що утворюються в реакторі збільшується в 10 разів при зростанні сили току.

Також можна відмітити максимум концентрації оксиду нітрогену на рівні 80 ppm, при зростанні сили току через установку від 1 до 8 А. Максимум концентрація діоксиду нітрогену при 8 А дещо менше, знаходиться на рівні 40 ppm (рис. 8).

Додатково встановлено, що можна навести, що наявність перекис гідрогену в парі, яка утворює потік плазми та збільшення сили току приблизно в 5 разів збільшує кількість діоксидів нітрогену. Кількість оксидів нітрогену, що

утворюються в реакторі зменшується до нуля при зростанні сили току (рис. 6).

Дані, представлені на рис. 9, свідчать про те, що в кожній серії експериментів кількість оксидів азоту залишалася практично незмінною. За стабільних умов роботи ефективність плазмогенератора майже не залежала від об'єму повітря, що подавалося в систему. В тій самий час процес суттєво залежало від кількості утворених радикалів ОН під час розкладання активаторів та збільшенні сили току через установку.

Результати досліджень показують, що процес утворення оксидів азоту в стабільному плазмовому потоці відбувався у всіх дослідах. Концентрація оксидів азоту визначалася параметрами роботи плазмогенератора, складом рідини в пальнику та силою току через установку. Однак максимальна досягнута концентрація становила лише 80 ppm.

Зроблено висновок, що лімітуючим етапом процесу окислення атмосферного азоту є утворення радикалів. Іншими словами, здатність плазмогенератора створювати радикали в заданих умовах визначає його продуктивність.

Недоліком проведеного дослідження є те, що спроба отримати нітратну кислоту шляхом абсорбції оксидів азоту в скляній Дрекселя виявилася невдалою. Методи титрування та використання нітрат-селективного електрода для визначення нітратної кислоти не дали позитивних результатів, ймовірно, через недостатню концентрацію оксидів азоту в газовій суміші.

Конструкція запропонованого реактора (рис. 4) виявилася досить стійкою, і хоча процес успішно відтворювався в різних паралельних експериментах, управління ним виявилось складним, завдяки недосконалої конструкції форсунки.

Не вдалося визначити вплив інтенсивності опромінення, оскільки у цій конструкції світло було побічним ефектом, що супроводжував процес генерування плазми.

Згідно з результатами теоретичних і практичних досліджень, можна припустити, що при певних умовах у потоці плазми може відбуватися процес окислення атмосферного азоту. Цей етап є критичним для отримання нітратної кислоти шляхом прямого окислення атмосферного азоту.

У ході дослідження було підтверджено ефективність застосування холодної плазми для окислення атмосферного азоту, що підтверджується отриманими

експериментальними результатами. Встановлено, що кількість оксидів азоту залежить від здатності плазми генерувати стабільний потік ОН-радикалів. Крім того, визначено залежність концентрації оксидів азоту від характеристик роботи плазмогенератора, складу рідини, що використовується в пальнику, та сили струму через пристрій. Збільшення сили струму через установку сприяє підвищенню утворення оксидів азоту в 2–8 разів.

Дослідження виявило, що сила струму через установку та присутність активуючих речовин впливають на швидкість окислення атмосферного азоту і утворення оксидів азоту. Було встановлено, що збільшення сили струму призводить до зростання швидкості утворення оксидів азоту для всіх активуючих речовин у 3–6 разів (рис. 8).

Подальші дослідження повинні бути спрямовані на вивчення впливу концентрації перекису водню в дистилаті та сили току через установку для вдосконалення експериментальної установки.

Отримані експериментальні дані дозволяють припустити, що кількість утворених оксидів азоту в установці залежить від ефективності створення стабільного потоку ОН-радикалів у плазмовому потоці.

У роботі було вивчено можливості використання холодної плазми для створення умов окислення атмосферного азоту. Визначено, що для реалізації процесу отримання нітратної кислоти з атмосферного повітря за методом Захарова із застосуванням ефектів Караваєва та Нагієва було запропоновано та реалізовано лабораторну установку на основі плазмогенератора «Горинич».

## 7. Висновки

1. У ході дослідження було підтверджено ефективність використання холодної плазми для окислення атмосферного азоту, що підтверджується експериментальними даними. Встановлено, що кількість утворених оксидів азоту залежить від здатності плазми формувати стабільний потік ОН-радикалів. Крім того, визначено залежність концентрації оксидів азоту від параметрів роботи плазмогенератора, складу рідини, яка використовується в пальнику, та сили струму через установку. Збільшення сили струму через установку сприяє збільшенню кількості оксидів азоту приблизно в 2–8 разів.

2. Дослідження виявило вплив сили струму через установку в присутності речовин активаторів процесу окислення атмосферного азоту на швидкість утворення оксидів азоту. Дослідження показали, що при збільшенні сили току через установку швидкість утворення оксидів азоту збільшується для усіх речовин активаторів в 3–6 разів. Порівняння речовин-активаторів, здатних при розкладі утворювати ОН-радикали, показало, що перекис водню є найбільш перспективним активатором.

## Література

1. Sulay, R.; Krishnan, A.; Muralikrishna, B.; Devadas, S.; Rajalakshmi, C.; Mathew, J.; Thomas, V.I. A Quantum Chemical Investigation into the Molecular Mechanism of the Atmospheric Reactions of Chemi-Ions with Nitrogen and Nitrogen Oxides. *Entropy* 2022, 24, 1257. <https://doi.org/10.3390/e24091257>
2. Sobitri Sen, Dr. Arijit Bag, Prof. Sourav Pal Activation, Conversion of Molecular Nitrogen to the Precursor of Ammonia on Silicon Substituted Cyclo[18]Carbon: a DFT Design ChemPhysChem, 10.1002/cphc.202400535, 21 September 2022 <https://doi.org/10.1002/cphc.202200627>
3. Severin, Kay Synthetic chemistry with nitrous oxide, *Chemical Society Reviews*, CS-REV-04-2015-000339.R1, 15-Jun-2015. DOI <https://doi.org/10.1039/C5CS00339C>
4. Carlos A. Process Intensification in Nitric Acid Plants by Catalytic Oxidation of Nitric Oxide, Carlos A., Grande, Kari Anne Andreassen, Jasmina H. Cavka, David Waller, Odd-Arne Lorentsen, Halvor Industrial & Engineering Chemistry Research Volume 57, Issue 31 August 8, 2018 Pages 10061-10718 [https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.iecr.8b01483?utm\\_source=chatgpt.com](https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.iecr.8b01483?utm_source=chatgpt.com)
5. Xiaoli Sun, Xuri Huang Reaction of Ta<sub>3</sub>- Clusters with Molecular Nitrogen: A Mechanism Investigation, *ACS Omega* 2022 7 (26), 22682-22688 DOI: 10.1021/acsomega.2c02138
6. Tselishchev, A. Research of change in fraction composition of vehicle gasoline in the modification of its biodethanol in the cavitation field / Loriya, M., Boychenko, S., Kudryavtsev, S., Laneckij, V. // *EUREKA, Physics and Engineering* 2020(5), с. 12-20 [https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract\\_id=3752572](https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=3752572)
7. Tofik M Nagiev Nitrogen fixation at conjugated oxidation by hydrogen peroxide Tofik M Nagiev , Nahmad, Ali-zadeh, and Inara T Nagieva, *Journal of Material Sciences & Engineering*, ISSN: 2169-0022, May 20-22, 2019 Zurich, Switzerland. <https://www.hilarispublisher.com/proceedings/nitro>

- gen-fixation-at-conjugated-oxidation-by-hydrogen-peroxide-14282.html?utm\_source=chatgpt.com
8. Zakharov I. I. Quantum Chemistry of Nitric Acid: Electronic Structure and Reactivity of its Decomposition Products / I. I. Zakharov // Advances in Chemistry Research. 2012. Vol. 16. P. 1-51. Editors: James C. Taylor, N.Y. Nova Science Publishers (USA).
  9. Захаров І. І. Структура інтермедіата НОО-N=N-ООН при активації N<sub>2</sub> перекисью водороду. Квантово-хімічні DFT розрахунки / І. І. Захаров, М. Г. Лорія, А. Б. Целищев // Журнал структурної хімії. 2013. Т. 54, №1. С. 17–24.] <https://nau.edu.ua/site/variables/news/2019/1/avtoref%20Tselichev.pdf>
  10. Slobodyanyuk, V. Determining the possibility of using cold plasma for the oxidation of atmospheric nitrogen into nitrogen oxides and the influence of activating substances on the process Slobodyanyuk, V., Kuzmenko, A., Kudriavtsev, S., Tselishchev, O., Loria, M. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies This link is disabled., 2023, 6(6-126), pp. 80–87. <https://journals.uran.ua/ejet/article/view/293873>

#### Reference

1. Sulay, R.; Krishnan, A.; Muralikrishna, B.; Devadas, S.; Rajalakshmi, C.; Mathew, J.; Thomas, V.I. A Quantum Chemical Investigation into the Molecular Mechanism of the Atmospheric Reactions of Chemi-Ions with Nitrogen and Nitrogen Oxides. Entropy 2022, 24, 1257. <https://doi.org/10.3390/e24091257>
2. Sobitri Sen, Dr. Arijit Bag, Prof. Sourav Pal Activation, Conversion of Molecular Nitrogen to the Precursor of Ammonia on Silicon Substituted Cyclo[18]Carbon: a DFT Design ChemPhysChem, 10.1002/cphc.202400535, 21 September 2022 <https://doi.org/10.1002/cphc.202200627>
3. Severin, Kay Synthetic chemistry with nitrous oxide, Chemical Society Reviews, CS-REV-04-2015-000339.R1, 15-Jun-2015. DOI <https://doi.org/10.1039/C5CS00339C>
4. Carlos A. Process Intensification in Nitric Acid Plants by Catalytic Oxidation of Nitric Oxide, Carlos A., Grande, Kari Anne Andreassen, Jasmina H. Cavka, David Waller, Odd-Arne Lorentsen, Halvor Industrial & Engineering Chemistry Research Volume 57, Issue 31 August 8, 2018 Pages 10061-10718 [https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.iecr.8b01483?utm\\_source=chatgpt.com](https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.iecr.8b01483?utm_source=chatgpt.com)
5. Xiaoli Sun, Xuri Huang Reaction of Ta<sub>3</sub>– Clusters with Molecular Nitrogen: A Mechanism Investigation, ACS Omega 2022 7 (26), 22682-22688 DOI: 10.1021/acsomega.2c02138
6. Tselishchev, A. Research of change in fraction composition of vehicle gasoline in the modification of its biodethanol in the cavitation field / Loria, M., Boychenko, S., Kudryavtsev, S., Laneckij, V. // EUREKA, Physics and Engineering 2020(5), s. 12-20 [https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract\\_id=3752572](https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=3752572)
7. Tofik M Nagiev Nitrogen fixation at conjugated oxidation by hydrogen peroxide Tofik M Nagiev, Nahmad, Ali-zadeh, and Inara T Nagieva, Journal of Material Sciences & Engineering, ISSN: 2169-0022, May 20-22, 2019 Zurich, Switzerland. [https://www.hilarispublisher.com/proceedings/nitrogen-fixation-at-conjugated-oxidation-by-hydrogen-peroxide-14282.html?utm\\_source=chatgpt.com](https://www.hilarispublisher.com/proceedings/nitrogen-fixation-at-conjugated-oxidation-by-hydrogen-peroxide-14282.html?utm_source=chatgpt.com)
8. Zakharov I. I. Quantum Chemistry of Nitric Acid: Electronic Structure and Reactivity of its Decomposition Products / I. I. Zakharov // Advances in Chemistry Research. 2012. Vol. 16. P. 1-51. Editors: James C. Taylor, N.Y. Nova Science Publishers (USA).
9. Zakharov Y. Y. Struktura yntermedyata NOO-N=N-ООН pry aktyvatsyy N<sub>2</sub> perekysiu vodoroda. Kvantovo-khymycheskye DFT raschetы / Y. Y. Zakharov, M. H. Loryia, A. B. Tselyshchev // Zhurnal struktornoj khymyy. 2013. T. 54, №1. S. 17–24.] <https://nau.edu.ua/site/variables/news/2019/1/avtoref%20Tselichev.pdf>
10. Slobodyanyuk, V. Determining the possibility of using cold plasma for the oxidation of atmospheric nitrogen into nitrogen oxides and the influence of activating substances on the process Slobodyanyuk, V., Kuzmenko, A., Kudriavtsev, S., Tselishchev, O., Loria, M. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies This link is disabled., 2023, 6(6-126), pp. 80–87. <https://journals.uran.ua/ejet/article/view/293873>

#### **Slobodyanyuk V.P., Kudryavtsev S.O., Tselishchev O.B., Loria M.G. Determination of the possibility of using cold plasma for the oxidation of atmospheric nitrogen into nitrogen oxides and the influence of activating substances on the process**

*The object of study is the process of oxidation of atmospheric nitrogen into nitrogen oxides. The oxidation of atmospheric nitrogen to produce nitric acid is important for the development of new methods of atmospheric nitrogen binding and methane activation, which are fundamental problems in the field of chemical science and technology. The process of molecular nitrogen oxidation and the dependence of nitrogen oxides content on the current strength through an installation with an electric arc low-temperature plasma generator were studied.*

*To confirm the hypothesis, quantum chemical studies of the reaction activity of nitric acid and its decomposition products were carried out. At the initial stage, quantum chemical DFT calculations were performed to determine the electronic structure and thermodynamic parameters of the ground state of nitric acid and its three known isomers.*

*To implement the process of producing nitric acid from atmospheric air using reproductive technology, a reactor design for the production of nitrogen oxides by direct oxidation of nitrogen in a cold plasma flow was proposed. It was proposed to use the effect of producing nitrogen oxides in an air mixture with nitric acid vapor and during the thermal decomposition of nitric peroxide with atmospheric nitrogen. The efficiency of using cold plasma for the oxidation of atmospheric nitrogen has been established, which is confirmed by the obtained dependences. The influence of the current strength through the installation in the presence of hydrogen peroxide and alcohols as activators of the process of atmospheric nitrogen oxidation in a high-energy environment was revealed. Studies have shown that with an increase in the current through the plant, the amount of nitrogen oxides increases for all activator substances by 2 to 8 times.*

*The influence of the nitrogen oxides content on the current strength through the installation with an electric arc low-temperature plasma generator was revealed. It is determined that when comparing activating agents that are capable of forming OH radicals during their decomposition, hydrogen peroxide is the most promising activating agent for the process of oxidation of atmospheric nitrogen in a plasma flow.*

**Key words:** *molecular nitrogen, direct oxidation, cold plasma, nitrogen oxides, laser matron, hydrogen peroxide*

**Слободянюк Віктор Петрович** – аспірант, Генеральний директор ПрАТ «ПлазмаТек»  
E-mail: [slobodyanyuk.viktor@plasmatec.com.ua](mailto:slobodyanyuk.viktor@plasmatec.com.ua)

**Кудрявцев Сергій Олександрович** – кандидат технічних наук, доцент, Кафедра хімічної інженерії та екології Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля  
E-mail: [kudriavcev@snu.edu.ua](mailto:kudriavcev@snu.edu.ua)

**Целішев Олексій Борисович** - доктор технічних наук, професор, Кафедра хімічної інженерії та екології Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля  
E-mail: [atp00@ukr.net](mailto:atp00@ukr.net)

**Лорія Марина Геннадіївна** – доктор технічних наук, професор, Кафедра комп'ютерно-інтегрованих систем управління Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля  
E-mail: [atp01@ukr.net](mailto:atp01@ukr.net)

Стаття подана 10.05.2025.

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-291-5-88-94>

УДК 544.7

## МЕТОД ГРАДУЮВАННЯ ПРОБНИХ РІДИН ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ПОВЕРХНЕВОЇ ЕНЕРГІЇ МЕТОДОМ ОУЕНСА-ВЕНДТА

Страшенко В.К., Миронюк О.В.

## CALIBRATION METHOD FOR TEST LIQUIDS FOR MEASURING SURFACE ENERGY BY THE OWENS-WENDT METHOD

Strashenko V.K., Myroniuk O.V.

У представленій науковій роботі здійснено комплексне дослідження поверхневих характеристик сумішевих рідин з використанням методики графічного аналізу, розробленої Оуенсом і Вендтом, що дозволяє кількісно розділити загальний поверхневий натяг на два основні компоненти — дисперсну та полярну складові. З метою підвищення точності та надійності результатів розрахунків у роботі запропоновано використання ряду полімерних матеріалів із заздалегідь відомими поверхневими властивостями як калібрувальних субстратів для визначення контактних кутів змочування. Це дозволило розширити застосування графічного підходу Оуенса–Вендта до аналізу складних багатокомпонентних рідинних систем, зокрема таких, що містять як неполярні органічні розчинники, так і речовини з вираженим полярним або водневим зв'язком.

У ході дослідження було досліджено змочування різними сумішами полімерних поверхонь на основі поліетилену, поліпропілену, тefлону, полістиролу та інших полімерів, що мають різні співвідношення дисперсної та полярної складових поверхневого натягу. Отримані експериментальні значення контактних кутів дали змогу побудувати апроксимуючі прямі в координатах методу Оуенса–Вендта для кожної суміші та кожної поверхні. Завдяки цьому стало можливим обчислення окремих компонентів поверхневого натягу для досліджуваних рідинних систем із високим ступенем точності. Проаналізовано вплив складу сумішей на зміну величин полярної та дисперсної взаємодій на межі поділу фаз.

Крім того, продемонстровано, що збільшення кількості полімерних калібрувальних поверхонь призводить до зменшення похибок при лінійній апроксимації та дозволяє уникнути систематичних відхилень у визначенні параметрів поверхневої енергії. Отримані результати узгоджуються з

літературними даними, що підтверджує достовірність розробленого підходу. Представлена методика може бути ефективно застосована для оцінювання поверхневих властивостей нових композиційних матеріалів, рідких препаратів і функціональних рідин у різноманітних галузях хімії, біотехнології та матеріалознавства. Таким чином, дослідження не лише розширює можливості застосування класичного підходу Оуенса–Вендта, але й пропонує новий інструмент для точнішої та зручнішої оцінки міжмолекулярної взаємодії в системах із рідинною фазою.

**Ключові слова:** полімер, змочування, кут змочування, калібрування

**Постановка проблеми.** Поверхнева енергія твердих тіл є показником, який кількісно визначає потенціал поверхні до взаємодії з рідинами в процесах змочування, утворення адгезійного контакту, видалення рідини з поверхні, закипання, конденсації, тощо. В залежності від обраної моделі описання цього параметру (Зісмана, Оуенса–Вендта, Ван Осса і т.д.), визначається кількість його компонентів. А його вимірювання базується здебільшого на визначенні кутів змочування поверхні твердого матеріалу набором рідин з відомим значеннями (або додатково компонентами) поверхневого натягу. В якості таких рідин виступають індивідуальні розчинники з високим ступенем чистоти. Але, такий підхід не забезпечує достатньої дискретності значень поверхневого натягу для отримання системи моніторингу процесів змочування. Це обмеження може бути подолане за рахунок використання сумішевих розчинників, поверхневий натяг яких легко

може бути вимірний методом сталагмометрії. Це забезпечує набір експериментальних даних для реалізації методу Зісмана, але не є достатнім для багатofакторних методів, наприклад, методу Оуенса-Вендта. Відповідно, основною проблемою, яка вирішується в даній роботі є розробка методу градування сумішевих поверхневих рідин за параметрами поверхневого натягу та його компонентів в рамках теорії Оуенса-Вендта.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Актуальність дослідження поверхневої енергії твердих тіл, зокрема полімерних матеріалів, зумовлена зростаючим попитом на високоефективні функціональні покриття, композити та біомедичні матеріали. Поверхнева енергія визначає змочуваність, адгезію, біосумісність, а також взаємодію матеріалу з іншими фазами — рідинами, газами чи твердими тілами. У випадку полімерів, які активно застосовуються в медицині, електроніці, упаковці та машинобудуванні, контроль поверхневих властивостей дає змогу цілеспрямовано змінювати експлуатаційні характеристики: від гідрофільності до бар'єрних властивостей[1,2].

Сучасні методи модифікації полімерних поверхонь — плазмова обробка[3,4] хімічне функціонування, нанесення наноструктур — вимагають точного розуміння впливу на поверхневу енергію. Це критично важливо для забезпечення адгезії в багатofазових структурах, стійкості до забруднення або біообростання, а також для покращення механічного з'єднання з іншими матеріалами[5]. Таким чином, дослідження поверхневої енергії є не лише фундаментально важливим, але й практично необхідним для розробки інноваційних матеріалів з прогнозованими властивостями.

Існує кілька основних теорій та моделей, які описують поверхневу енергію твердих тіл і дозволяють оцінити її на основі контактних кутів змочування. Серед найвідоміших і найуживаніших — моделі Зісмана, Оуенса-Вендта, Фоукса та ван Осса—Гуд—Чарт'є.

Теорія Зісмана є однією з найпростіших. Вона базується на побудові графіка залежності косинуса контактного кута від поверхневого натягу рідини. Точка перетину екстрапольованої прямої з віссю  $x$  (при  $\cos\theta \rightarrow 1$ ) вказує на критичний поверхневий натяг — значення, що наближено дорівнює поверхневій енергії твердого тіла. Метод Зісмана найкраще підходить для низькоенергетичних,

гідрофобних, аполярних поверхонь, зокрема поліолефінів (поліетилен, поліпропілен), де міжмолекулярні взаємодії переважно дисперсійні[6].

Модель Оуенса-Вендта розділяє поверхневу енергію на дві складові — дисперсійну та полярну. Ця модель дозволяє глибше проаналізувати характер міжфазних взаємодій, що є особливо важливим для помірно полярних поверхонь, таких як поліестери, полікарбонати або модифіковані полімери. Для застосування методу потрібне вимірювання контактних кутів для щонайменше двох рідин з відомими компонентами поверхневого натягу[7].

Теорія Фоукса, яка є розвитком моделі Оуенса-Вендта, ґрунтується на термодинаміці адгезії та використовує енергетичну концепцію кислотно-основних взаємодій. Поверхнева енергія також поділяється на дисперсійну й полярну складові, з акцентом на хімічну природу міжмолекулярних сил. Модель Фоукса застосовують у дослідженнях інженерних полімерів, а також матеріалів з вираженою електронною полярністю.

Теорія ван Осса—Гуда—Чарт'є (van Oss—Chaudhury—Good) є найбільш комплексною, вона поділяє поверхневу енергію на три компоненти: дисперсійну (Lifshitz—van der Waals), кислотну (електроноакцепторну) та основну (електронодонорну). Такий підхід дозволяє точно описувати адгезійні властивості поверхонь, особливо біоматеріалів, окиснених металів, склоподібних і керамічних субстратів. Теорія ван Осса є дуже популярною в біоінженерії, медицині та у сфері створення антибактеріальних покриттів, де кислотно-основні взаємодії відіграють ключову роль.

Таким чином, вибір теорії для аналізу поверхневої енергії залежить від типу досліджуваного матеріалу. Для аполярних полімерів доцільно використовувати модель Зісмана; для більшості органічних полімерів — Оуенса-Вендта або Фоукса; для складних, хімічно активних чи біологічно сумісних поверхонь — модель ван Осса. Кожна з теорій має свої обмеження і переваги, але разом вони утворюють потужний інструментарій для розуміння і модифікації поверхневих властивостей матеріалів.

Для точного визначення значень компонентів поверхневої енергії за теорією Оуенса-Вендта необхідно ретельно підібрати набір тестових рідин з відомими значеннями поверхневого натягу та його полярної і

дисперсійної складових. Ця модель передбачає розділення загальної поверхневої енергії твердої поверхні на дисперсійну та полярну компоненти, а для обчислень використовуються контактні кути змочування, виміряні для різних рідин. Щоб уникнути похибок у розрахунках, набір рідин повинен охоплювати якомога ширший діапазон співвідношень між полярною та дисперсійною складовими.

Особливо важливо, щоб ці рідини мали параметри поверхневого натягу, що варіюються з мінімальним кроком, тобто з плавним переходом від суто дисперсійних (наприклад, дийодметан) до високо полярних (наприклад, вода). Такий підхід дозволяє зменшити похибки, пов'язані з апроксимацією кривої в координатах моделі Оуенса-Вендта, та підвищує точність обчислення обох компонент енергії. У разі використання лише двох рідин або вибору рідин із близькими характеристиками, система рівнянь стає математично нестійкою, що призводить до значного розкиду результатів. Отже, чим ширший і краще підібраний набір рідин, тим надійнішим буде розрахунок поверхневої енергії твердої поверхні.

**Мета роботи** сформулювати метод, який дозволяє відградувати пробні рідини, включаючи суміші, за компонентами поверхневого натягу у відповідності до теорії Оуенса-Вендта.

**Виклад основного матеріалу. Визначення поверхневого натягу градуювальних поверхонь** Рівняння Юнга (1) описує фактори - поверхневу енергію на різних межах поділу фаз, які визначають значення кута змочування  $\theta$ . Індекс (ТВ-Г) відповідає поверхневій енергії на межі тверде тіло-газ і, відповідно, поверхневій енергії цього тіла, (ТВ-р) - поверхнева енергія на межі тверде тіло-рідина, (р) - на межі рідина газ, що еквівалентно поверхневому натягу рідини.

$$\cos\theta = \frac{\sigma_{ТВ-Г} - \sigma_{ТВ-р}}{\sigma_p} \quad (1)$$

В роботі було використано теорію Оуенса-Вендта яка розглядає поверхневий натяг як двокомпонентний параметр. При цьому, загальне його значення є середнім геометричним дисперсної та полярної частини. Основне рівняння теорії (2) описує взаємозв'язок між значеннями кута змочування рідини на твердій поверхні та компонентами їх поверхневої енергії.

$$\sigma_p(1 + \cos\theta) = 2(\sqrt{\sigma_{пв}^D \sigma_p^D} + \sqrt{\sigma_{пв}^P \sigma_p^P}) \quad (2)$$

де  $\sigma_p$  загальний поверхневий натяг рідини. Відповідно до теорії Оуенса-Вендта його можна розділити на полярний ( $\sigma_p^P$ ) та дисперсійний ( $\sigma_p^D$ ) поверхневий натяг рідини. Також в рівнянні наявні значення і для поверхонь, а саме полярний ( $\sigma_{пв}^P$ ) та дисперсійний  $\sigma_{пв}^D$  показник поверхневого натягу для поверхні. Косинус кута змочування рідини з поверхнею виражено значення  $\cos\theta$ .

При умові використання рідин з відомим поверхневим натягом та його компонентами, визначення кута змочування рідиною обраної поверхні, в ньому залишаються два невідомих - компоненти поверхневої енергії. Останні можуть бути знайдені при використанні системи рівнянь (практично - використання набору пробних рідин). Ця задача може бути вирішена і в протилежну сторону - використовуючи набір поверхонь з відомими значеннями поверхневої енергії можливо знайти компоненти поверхневого натягу рідини при умові що загальний поверхневий натяг відомий (визначений, наприклад методом сталагмометрії). Найбільш практичним методом знайдення невідомих компонентів поверхневої енергії або натягу є графічний, сутність якого полягає у використанні зміненого рівняння Оуенса-Вендта (3), яке графічно є рівнянням прямої лінії.

$$\frac{\sigma_p(1 + \cos\theta)}{2\sqrt{\sigma_p^D}} = \frac{\sqrt{\sigma_p^P}}{\sqrt{\sigma_p^D}} * \sqrt{\sigma_{пв}^P} + \sqrt{\sigma_{пв}^D} \quad (3)$$

На вісі абсцис розташоване співвідношення  $\left(\frac{\sqrt{\sigma_p^P}}{\sqrt{\sigma_p^D}}\right)$  для індивідуальних рідин, та по осі ординат  $\frac{\sigma_p(\cos\theta + 1)}{2\sqrt{\sigma_p^D}}$ .

Побудовані в цих специфічних координатах точки апроксимуються прямою лінією, тангенс кута нахилу якої чисельно дорівнює  $\sqrt{\sigma_{пв}^P}$ , а відтинок від вісі ординат -  $\sqrt{\sigma_{пв}^D}$ .

На першому етапі роботи було визначено компоненти поверхневої енергії ряду полімерних зразків. Для цього використано 5 пробних рідин з відомим значенням

поверхневого натягу, а саме: вода, ксилол, етилацетат, етиленгліколь та диметилсульфоксид. Параметри які використовувалися для розрахунків наведені в таблиці 1.

місця аргументу та відтинку займали відповідно, корінь з полярної та дисперсної компоненти поверхневого натягу рідин.

$$\frac{\sigma_p(1+\cos\theta)}{2\sqrt{\sigma_{пв}^D}} = \frac{\sqrt{\sigma_{пв}^P}}{\sqrt{\sigma_{пв}^D}} * \sqrt{\sigma_p^P} + \sqrt{\sigma_p^D} \tag{3}$$

Таблиця 1

**Значення поверхневих натягів відомих речовин[8]**

Рідина	Поверхневий натяг загальний	Поверхневий натяг дисперсійний	Поверхневий натяг полярний
Вода	72,44	22,10	50,70
Ксилол	30,10	30,10	0
Етиленацетат	23,90	23,90	0
Етиленгліколь	46,10	29,00	19,10
Диметилсульфоксид	44,50	36,50	8,00

Крайовий кут змочування визначали стандартним методом лежачої краплі за допомогою горизонтального мікроскопа з гоніометричною приставкою [9]. Для визначення кута змочування поверхонь досліджуваних матеріалів використано мікроскоп із цифровою камерою Delta Optical HCDE-50. Значення кута змочування визначали на підставі отриманих фотографій із використанням програмного продукту ScoreTeck View, з цифровим гоніометром.

На рис. 1 наведено графіки Оуенса-Вендта для досліджуваних поверхонь полімерів, апроксимовані прямими. На їх основі одержано значення компонентів поверхневої енергії (таблиця 2).

Оскільки всі використані в роботі полімери є відносно неполярними, їм характерні низькі значення полярної компоненти поверхневої енергії. За цим параметром вони можуть бути розташовані в ряд збільшення полярності тефлон - полідиметилсилоксан - поліетилен - поліетилентерефталат.

Визначені компоненти поверхневої енергії в подальшому використовувалися для встановлення компонент поверхневого натягу пробних рідин. Для цього застосовувалося обернене рівняння Оуенса-Вендта, в якому

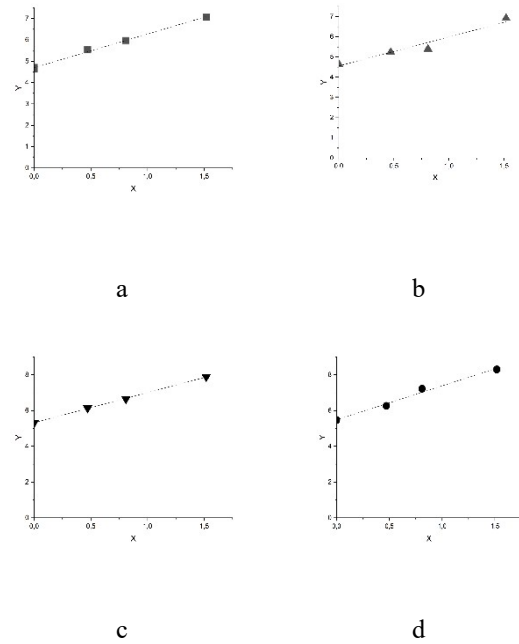


Рис. 1. Графіки для розрахунків поверхневого натягу поверхонь:  
 а – Силікон; б – Тефлон  
 с – Поліетилен d – Поліетилентерефталат

Таблиця 2

**Компоненти поверхневої енергії зразків полімерів**

Поверхня	Полірна компонента, мДж/м2	Дисперсна компонента, мДж/м2
Полідиметилсилоксан	2,49	22,07
Тефлон	2,06	20,76
Поліетилен	2,84	28,35
Поліетилентерефталат	3,62	30,07

На рисунку 2 представлено графіки всіх восьми пробних рідин, які являли собою водно-етанольні суміші з різним співвідношенням компонентів

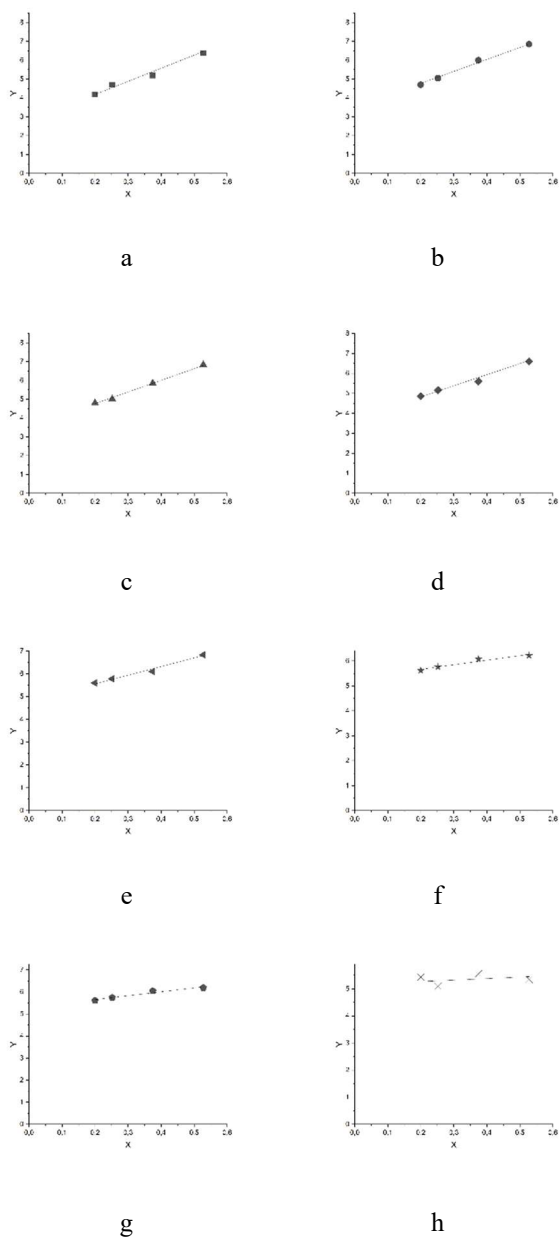


Рис. 2. Графіки для розрахунків поверхневого натягу індивідуальних речовин:  
а – 1; б – 2; с – 3; д – 4; е – 5; ф – 6; г – 7; h – 8

Відповідні значення полірної та дисперсної компоеннт поверхневого натягу, які були визначені графічно з апроксимаційних прямих Рис.2 наведено в Табл.3. Очевидно, що при збільшенні концентрації етилового спирту зменшується загальний поверхневий натяг, а

також зменшується полярна його складова, що є очікуваним, оскільки власна полярна складова етилового спирту значно нижче ніж у воді.

Таблиця 3

№	Співвідношення, мас. %		Густина, г/см <sup>3</sup>	Загальний поверхневий натяг, мН/м	Поверхневий натяг полярний мН/м	Поверхневий натяг дисперсний мН/м
	Вода	Етиловий спирт				
1	96	4	0,9910	56,08	48,26	7,82
2	94	6	0,9865	52,40	40,07	12,23
3	92	8	0,9819	50,80	38,36	12,44
4	90	10	0,9770	44,74	30,97	13,77
5	84	16	0,9647	37,48	13,49	22,99
6	80	20	0,9546	32,85	6,88	25,97
7	76	24	0,9481	32,34	6,12	26,22
8	60	40	0,9139	28,47	2,05	26,42

**Висновок.** Сформульовано метод градування компонентів поверхневого натягу пробних рідин в рамках підходу Оуенса-Вендта на прикладі водно-етанольних сумішей. Суть методу полягає у виборі еталонних полімерних поверхонь, визначенні компонентів їх поверхневої енергії при використанні рідин з відомим поверхневим натягом класичним методом Оуенса-Вендта та використанні отриманих значень в оберненому рівнянні для одержання компонент поверхневого натягу розчинів.

Метод дозволяє одержати набір пробних рідин для визначення характеристик змочування у вузьких інтервалах поверхневого натягу, що може бути корисним для характеристики особливих станів змочування, наприклад, стану Касі супергідрофобних поверхонь, або переходів між різними станами змочування.

## Література

1. Rodney Marcelo Do Nascimento, Joao Elias F.S. Rodrigues. A novel framework for evaluating the surface free energy and depinning forces of invasive medical tubes. *Chemical Engineering Science*. 2025. T. 312.

2. You Chen, Zhibin Jiao. Elsevier Chemical Engineering Journal Volume 506, 15 January 2025, 160041 Chemical Engineering Journal Bio-inspired anti-glare and self-cleaning surface for optical/tissue residue pollution treatment of medical device surface. *Chemical Engineering Journal*. 2025. T. 506 : 160041. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2025.160041>.

3. P. Dimitrakellis, E. Gogolides. Atmospheric plasma etching of polymers: A palette of applications in cleaning/ashing, pattern formation, nanotexturing and superhydrophobic surface fabrication. *Microelectronic Engineering*. 2025. T. 194. C. 109–115.

4. Alexane Vital, Marylène Vayer. Polymer masks for structured surface and plasma etching. *Applied Surface Science*. 2015. T. 332. C. 237–246.

5. Anatoly E. C. Adhesion and Energy Characteristics of Rigid-Chain Polymer Surface: Polyamidoimides. *Polymer Structure and Property III*. 2020. T. 2956.

6. S. Siboni. The solid surface free energy calculation: II. The limits of the Zisman and of the “equation-of-state” approaches. *Journal of Colloid and Interface Science*. 2004. T. 271. C. 454–472.

7. Anna R. Analysis for determining surface free energy uncertainty by the Owen–Wendt method. *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 2009. T. 29 : 4. C. 451–457.

8. Carel J. Van Oss. *Interfacial Forces in Aqueous Media*. Boca Raton : 2nd Edition, 2006. 456 с.

9. Особенности оценки смачивания полимерных поверхностей / Миронюк та ін. *Східно-Європейський журнал передових технологій*. 2014. Т. 67. С. 23–26.

## References

1. Rodney Marcelo Do Nascimento, Joao Elias F.S. Rodrigues. A novel framework for evaluating the surface free energy and depinning forces of invasive medical tubes. *Chemical Engineering Science*. 2025. T. 312.

2. You Chen, Zhibin Jiao. Elsevier Chemical Engineering Journal Volume 506, 15 January 2025, 160041 Chemical Engineering Journal Bio-inspired anti-glare and self-cleaning surface for optical/tissue residue pollution treatment of medical device surface. *Chemical Engineering Journal*. 2025. T. 506 : 160041. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2025.160041>.

3. P. Dimitrakellis, E. Gogolides. Atmospheric plasma etching of polymers: A palette of applications in cleaning/ashing, pattern formation, nanotexturing and superhydrophobic surface fabrication. *Microelectronic Engineering*. 2025. T. 194. C. 109–115.

4. Alexane Vital, Marylène Vayer. Polymer masks for structured surface and plasma etching. *Applied Surface Science*. 2015. T. 332. C. 237–246.

5. Anatoly E. C. Adhesion and Energy Characteristics of Rigid-Chain Polymer Surface: Polyamidoimides. *Polymer Structure and Property III*. 2020. T. 2956.

6. S. Siboni. The solid surface free energy calculation: II. The limits of the Zisman and of the “equation-of-state” approaches. *Journal of Colloid and Interface Science*. 2004. T. 271. C. 454–472.

7. Anna R. Analysis for determining surface free energy uncertainty by the Owen–Wendt method. *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 2009. T. 29 : 4. C. 451–457.

8. Carel J. Van Oss. *Interfacial Forces in Aqueous Media*. Boca Raton : 2nd Edition, 2006. 456 с.

9. Особенности оценки смачивания полимерных поверхностей. Миронюк та ін. *Східно-Європейський журнал передових технологій*. 2014. Т. 67. С. 23–26

### Strashenko V.K., Myroniuk O.V. Calibration method for test liquids for measuring surface energy by the Owens-Wendt method

*This scientific paper presents a comprehensive study of the surface characteristics of mixed liquids using a graphical analysis method developed by Owens and Wendt, which allows the total surface tension to be quantitatively divided into two main components: the dispersive and polar components. In order to improve the accuracy and reliability of the calculation results, the paper proposes the use of a number of polymer materials with known surface properties as calibration substrates for determining contact wetting angles. This made it possible to extend the application of the Owens–Wendt graphical approach to the analysis of complex multicomponent liquid systems, in particular those containing both nonpolar organic solvents and substances with pronounced polar or hydrogen bonds.*

*The study investigated the wetting of various mixtures of polymer surfaces based on polyethylene, polypropylene, Teflon, polystyrene and other polymers with different ratios of dispersed and polar components of surface tension. The experimental values of the contact angles obtained made it possible to construct approximate straight lines in the Owens–Wendt method coordinates for each mixture and each surface. This made it possible to calculate the individual components of surface tension for the studied liquid systems with a high degree of accuracy. The influence of the composition of mixtures on the change in the values of polar and dispersive interactions at the phase boundary was analysed.*

*In addition, it was demonstrated that an increase in the number of polymer calibration surfaces leads to a reduction in errors in linear approximation and allows avoiding systematic deviations in the determination of surface energy parameters. The results obtained are consistent with the literature data, which confirms the reliability of the developed approach. The presented methodology can be effectively applied to evaluate the surface properties of new composite materials, liquid preparations and functional fluids in various fields of chemistry, biotechnology and materials science. Thus, the study not only expands the possibilities of applying the classical Owens–Wendt approach, but also offers a new tool for a more accurate and convenient assessment of intermolecular interactions in systems with a liquid phase. The presented scientific work carries out a comprehensive study of the surface characteristics of mixed liquids using the graphical analysis method developed by Owens and Wendt, which allows the total surface tension to be quantitatively divided into two main components — the dispersive (London) and polar (dipole-dipole) components. In order to improve the*

accuracy and reliability of the calculation results, the paper proposes the use of a number of polymer materials with known surface properties as calibration substrates for determining contact wetting angles. This made it possible to extend the application of the Owens–Wendt graphical approach to the analysis of complex multicomponent liquid systems, in particular those containing both nonpolar organic solvents and substances with pronounced polar or hydrogen bonds.

The study investigated the wetting of various mixtures of polymer surfaces based on polyethylene, polypropylene, Teflon, polystyrene and other polymers with different ratios of dispersed and polar components of surface tension. The experimental values of the contact angles obtained made it possible to construct approximate straight lines in the Owens–Wendt method coordinates for each mixture and each surface. This made it possible to calculate the individual components of surface tension for the studied liquid systems with a high degree of accuracy. The influence of the composition of mixtures on the change in the values of polar and dispersive interactions at the phase boundary was analysed.

In addition, it was demonstrated that an increase in the number of polymer calibration surfaces leads to a reduction in errors in linear approximation and allows avoiding systematic deviations in the determination of surface energy parameters. The results obtained are consistent with the literature data, which confirms the

reliability of the developed approach. The presented methodology can be effectively applied to evaluate the surface properties of new composite materials, liquid preparations and functional fluids in various fields of chemistry, biotechnology and materials science. Thus, the study not only expands the possibilities of applying the classical Owens–Wendt approach, but also offers a new tool for a more accurate and convenient assessment of intermolecular interactions in systems with a liquid phase.

**Ключові слова:** polymer, wetting, wetting angle, calibration

**Страшенко Володимир Костянтинович** – аспірант, Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", хіміко-технологічний факультет, кафедра хімічної технології композиційних матеріалів, strashenkovork17@gmail.com.

**Миронюк Олексій Володимирович** – доктор технічних наук, доцент, Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", хіміко-технологічний факультет, кафедра хімічної технології композиційних матеріалів, o.myronyuk@kpi.ua

Стаття подана 15.05.2025.

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-291-5-95-108>

УДК 621.928:628.56

## СУЧАСНІ ПІДХОДИ ДО УТИЛІЗАЦІЇ ШЛАМОВИХ ВІДХОДІВ ГАЛЬВАНІЧНИХ ВИРОБНИЦТВ ЯК КАТАЛІЗАТОРІВ ОЧИЩЕННЯ ГАЗОВИХ ПОТОКІВ: ОГЛЯД ТЕХНОЛОГІЙ І ПЕРСПЕКТИВ

Шмиголь С.О., Столяренко Г.С.

## MODERN APPROACHES TO THE UTILISATION OF SLUDGE WASTE FROM ELECTROPLATING AS A CATALYST FOR GAS FLOW PURIFICATION: A REVIEW OF TECHNOLOGIES AND PROSPECTS

Shmyhol S.O., Stoliarenko H.S.

Проведено аналіз сучасних технологій утилізації шламових відходів гальванічних виробництв та їх використання, як каталізаторів для очищення газових потоків. Актуальність дослідження обумовлена зростанням обсягів промислових відходів і необхідністю розробки екологічно безпечних та економічно доцільних методів їх переробки. У цьому контексті особлива увага приділяється технологіям, що дозволяють перетворювати шламові відходи гальванічних виробництв не лише на побічні продукти, а й на корисні каталізатори для процесів очищення газових потоків. Мета статті – здійснити огляд сучасних підходів до утилізації шламових відходів гальванічних виробництв, зокрема, через використання їх як каталізаторів для очищення газових потоків. У дослідженні застосовано системний аналіз наукових джерел, експериментальні дослідження каталітичних властивостей матеріалів, отриманих із шламових відходів, а також порівняльний аналіз економічних та екологічних параметрів різних методів утилізації. Основні результати роботи включають оцінку ефективності різних підходів, зокрема термічної, хімічної та біотехнологічної обробки шламів, а також використання нанотехнологій для підвищення активності каталізаторів. Виявлено, що оптимальними є методи, що забезпечують високу каталітичну активність при мінімальних енергетичних витратах. Здійснено екологічну оцінку сучасних технологій переробки шламів. Визначено, що більш безпечними для навколишнього середовища та перспективними для малих підприємств є біотехнологічні методи переробки. Інтеграція відновлюваних джерел енергії та застосування новітніх матеріалів сприятимуть екологічній модернізації промисловості та розвитку

циркулярної економіки. Подальші дослідження мають бути спрямовані на оптимізацію технологічних процесів, підвищення ефективності каталізаторів та зниження витрат на їх виробництво. Інтеграція відновлюваних джерел енергії та застосування новітніх матеріалів сприятимуть екологічній модернізації промисловості та розвитку циркулярної економіки. Отримані результати можуть бути корисними для промислових підприємств у виборі технологій переробки відходів та вдосконалення систем очищення повітря, сприяючи розвитку екологічної безпеки.

**Ключові слова:** утилізація, шламові відходи, гальванічні виробництва, каталізатори, очищення газових потоків, хімічна активація, екологічна безпека.

**Вступ.** Проблема утилізації шламових відходів гальванічних виробництв є однією з найбільш актуальних у сучасній екології та промисловій практиці [1]. У відповідності до праці [2] сучасні гальванічні виробництва, які включають процеси електролітичного осадження металів, зокрема, в галузях машинобудування, електроніки, автомобільної промисловості, супроводжуються утворенням великих обсягів шламів. Ці відходи складаються із важких металів, таких як кадмій, свинець, мідь, хром, а також кислотних та лужних речовин, що робить їх особливо небезпечними для навколишнього середовища і здоров'я людини. На тлі зростаючого промислового

виробництва та посилення екологічних вимог до зменшення викидів забруднювальних речовин проблема утилізації шламів набуває глобального масштабу.

В Україні та світі обсяг таких відходів щороку збільшується [3], а традиційні методи їх утилізації, зокрема захоронення на полігонах, або спалювання, не лише є ресурсозатратними, але й створюють додаткові екологічні загрози. Викиди токсичних речовин із шламів можуть проникати в ґрунт, водні ресурси та атмосферу, що у свою чергу спричиняє забруднення екосистем і має негативний вплив на біорізноманіття, агросектор і людське здоров'я. Водночас, сучасні технології очищення газових потоків, що включають фільтрацію забруднюючих газів, зокрема оксидів азоту (NOx), сірководню (H<sub>2</sub>S) та інших шкідливих компонентів, стають одними з найважливіших елементів екологічної безпеки в промисловості. Очищення повітря, особливо в умовах розвинених мегаполісів та промислових регіонів, є критично важливим для зменшення шкідливого впливу на здоров'я населення. Водночас, зростаючі вимоги до зниження екологічного навантаження змушують розглядати нові рішення, які поєднують ефективну утилізацію промислових відходів з очищенням газових викидів.

У цьому контексті особлива увага приділяється технологіям, що дозволяють перетворювати шламові відходи гальванічних виробництв не лише на побічні продукти, а й на корисні каталізатори для процесів очищення газових потоків. Використання шламів як каталізаторів є перспективним напрямом, який дозволяє одночасно вирішувати проблеми утилізації відходів і зменшення забруднення атмосфери. Це може бути ефективним рішенням для комплексної переробки токсичних відходів і одночасного покращення якості навколишнього середовища. Актуальність порушеної проблеми підкріплюється як високими екологічними вимогами до промислових підприємств, так і необхідністю зниження витрат на утилізацію відходів. Дослідження і впровадження нових технологій утилізації шламів, зокрема через їх використання як каталізаторів для очищення газових потоків, може стати важливим етапом у розвитку зеленої економіки та індустрії переробки відходів. Окрім цього, подібні інноваційні технології можуть мати економічну вигоду, знижуючи витрати на утилізацію та одночасно створюючи додаткові можливості

для вторинного використання промислових відходів.

У результаті проблема утилізації шламових відходів гальванічних виробництв у контексті їх використання як каталізаторів для очищення газових потоків є надзвичайно актуальною та важливою для сталого розвитку промисловості та охорони навколишнього середовища. Вона вимагає комплексного підходу та застосування інноваційних технологій, які дозволяють не лише ефективно управляти відходами, а й знижувати екологічні ризики для суспільства.

**Мета роботи** – здійснити огляд сучасних підходів до утилізації шламових відходів гальванічних виробництв, зокрема, через використання їх як каталізаторів для очищення газових потоків. Аналізуючи існуючі технології, розглянути їх ефективність, потенціал для зменшення екологічного навантаження, а також економічні аспекти впровадження таких рішень. Окрім того, особливу увагу буде приділено перспективам розвитку даних технологій, зокрема можливостям вдосконалення процесів на основі нових матеріалів, методів обробки шламів та інноваційних підходів до забезпечення сталого розвитку галузі. Таким чином, цей огляд стане важливим внеском у розуміння потенціалу використання шламів гальванічних виробництв не лише як відходів, а й як ефективного ресурсу для екологічної та промислової модернізації.

**Матеріали та методологія.** Матеріали дослідження базуються на аналізі наукових статей, технічних звітів і патентної документації, що охоплює сучасні підходи до утилізації шламів та використання їх у якості каталізаторів для очищення газових потоків. Зазначені матеріали допомагають створити комплексну картину існуючих технологій та визначити напрямки для їх подальшого вдосконалення.

Методологія дослідження, описаного в цій статті дослідження базується на системному підході, який дозволяє всебічно вивчити технології утилізації шламових відходів гальванічних виробництв та їх використання як каталізаторів для очищення газових потоків. Першим етапом є комплексний розгляд існуючих методів утилізації шламів, таких як захоронення, термічна обробка та хімічна нейтралізація, а також їх застосування в якості каталізаторів для очищення газів, що дозволяє оцінити ефективність традиційних методів і відкрити нові можливості для використання шламів як корисних продуктів. Другим етапом є

оцінка каталізаторних властивостей шламів, що містять важкі метали та інші токсичні компоненти. Проводяться дослідження щодо їх активності в процесах очищення газів, таких як зменшення концентрації оксидів азоту (NO<sub>x</sub>), сірководню (H<sub>2</sub>S) і окислів вуглецю (CO). Експериментальні дані дозволяють отримати уявлення про те, наскільки ефективно шлами можуть використовуватися в промислових процесах очищення повітря. У ході дослідження також проводиться порівняння різних методів очищення газових потоків за допомогою шламових відходів з традиційними технологіями, які використовують дорогі метали та інші спеціалізовані каталізатори. Оцінюються техніко-економічні показники кожного методу, зокрема витрати на утилізацію відходів і на очищення газів, що дозволяє визначити найбільш економічно вигідні і ефективні підходи. Нарешті, вивчаються перспективи подальшого розвитку технологій, що використовують шлами як каталізатори для очищення газів. Особлива увага приділяється інноваційним матеріалам і методам, таким як використання наноматеріалів, а також новим методам синтезу та обробки каталізаторів, що можуть забезпечити ще вищу ефективність та екологічну безпеку в процесах очищення.

Оцінювання ефективності технологій утилізації шламових відходів гальванічних виробництв як каталізаторів очищення газових потоків здійснювалося за кількома критеріями, що дозволяють визначити їх здатність забезпечувати високий рівень очищення при мінімальних енергетичних витратах, економічній вигоді та впливі на навколишнє середовище. Ось основні критерії, на яких базується оцінка ефективності цих технологій:

**1. Ефективність очищення.** Це основний критерій, що визначає, наскільки ефективно технологія знижує концентрацію забруднювальних речовин у газових потоках. Показник ефективності очищення зазвичай виражається у відсотках і вимірюється як зменшення концентрації конкретних шкідливих компонентів (наприклад, оксидів азоту, сірки, важких металів) у порівнянні з початковими значеннями. Чим вищий цей показник, тим ефективніший метод. Важливо, що різні технології мають різні рівні ефективності, залежно від застосовуваних методів каталізу і типу шламових відходів.

**2. Витрати енергії.** Для кожної технології утилізації шламових відходів важливо оцінити, скільки енергії необхідно для процесу очищення

газів. Цей показник є важливим для аналізу економічної доцільності технології. Витрати енергії зазвичай виражаються в кВт·год на одиницю об'єму очищеного газу (кВт·год/м<sup>3</sup>). Технології, що потребують менше енергії, є більш економічно вигідними і менш ресурсозатратними, що може значно знизити вартість очищення на промислових об'єктах.

**3. Екологічний вплив.** Враховується, як кожна технологія впливає на навколишнє середовище. Це включає в себе як зменшення забруднення, так і можливість утилізації відходів, що утворюються в результаті процесу очищення. Зокрема, для біохімічних та хімічних методів оцінюється, наскільки використовувані реагенти або матеріали безпечні для екології.

**4. Температурний режим.** Оскільки багато методів утилізації шламових відходів потребують певного температурного діапазону для досягнення оптимальної ефективності, важливо також оцінити температуру, при якій процеси очищення відбуваються. Зазвичай методи, які працюють при високих температурах, можуть бути енергоємними, але ефективними у зниженні забруднень. Технології, що функціонують при більш низьких температурах, є більш енергоощадними і можуть бути більш привабливими з точки зору операційних витрат.

**5. Вартість очищення.** Вартість очищення газу визначається як витрати на технологічний процес, включаючи капітальні та операційні витрати. Оцінка цього критерію дає змогу порівняти економічну доцільність різних технологій. Для цього розраховується вартість очищення одного кубічного метра газу, що є важливим аспектом при масштабуванні технології на промисловому рівні.

**6. Перспективи розвитку технології.** Оцінка перспектив розвитку технології полягає в аналізі можливості її вдосконалення та адаптації до нових умов, зокрема, застосування відновлювальних джерел енергії, використання нових матеріалів і методів каталізу. Цей критерій також враховує можливість підвищення ефективності в майбутньому завдяки технологічним інноваціям, таким як використання нано-матеріалів, модифікація реакторів і зміна робочих параметрів.

**7. Час процесу.** Це важливий критерій, який вимірює, скільки часу потрібно для очищення певної кількості газу. Технології з коротшим часом очищення є більш привабливими для промислових підприємств, де важлива швидкість виробничих процесів.

Для кожного з цих критеріїв визначалися відповідні числові показники в процесі експериментів або досліджень, що дозволяє точно оцінити продуктивність та надійність технологій. Оцінка ефективності проводилась за допомогою порівняння результатів різних методів, що були застосовані в лабораторних, або промислових умовах. За результатами таких порівнянь проводиться вибір оптимальних рішень для конкретних умов, враховуючи вищезгадані критерії.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Загалом, наукові дослідження останніх років демонструють значний прогрес у використанні гальванічних шламів для створення каталізаторів, що допомагають вирішувати екологічні проблеми, пов'язані з очищенням промислових викидів та вод. Водночас є потреба в подальших дослідженнях для оптимізації технологічних процесів і підвищення ефективності використання таких матеріалів у промисловості.

За останні 5 років наукова спільнота досить активно досліджувала можливості утилізації шламових відходів гальванічних виробництв шляхом їх використання як каталізаторів для очищення газових потоків. Зокрема, автори праці [1] аналізували методи переробки шламових відходів гальванічних виробництв для створення каталізаторів, придатних для очищення промислових газових викидів. В основному автори вище вказаної праці зосередилися на термічній обробці шламів з метою отримання оксидів металів, які демонструють високу каталізаторну активність у процесах окиснення летких органічних сполук. Натомість, автори праці [2] дослідили можливість використання каталізаторів, отриманих з гальванічних шламів, для зниження оксидів азоту (NO<sub>x</sub>) у димових газах. Для цього автори вище вказаної праці провели серію експериментів, які показали, що такі каталізатори можуть ефективно знижувати концентрацію NO<sub>x</sub> при відповідних умовах реакції. Авторський колектив праці [3] розробив метод синтезу оксидних каталізаторів на основі відходів гальванічних виробництв для видалення летких органічних сполук (VOC) з газових потоків. Зокрема результати тестування, які отримали автори вище вказаного методу показали, що отримані каталізатори мають високу ефективність у процесах окиснення різних VOC. Автори праці [4] досліджували гідротермальну обробку гальванічних шламів для отримання каталізаторів, придатних для

очищення промислових газових потоків. Вони виявили, що такий підхід дозволяє отримати каталізатори з високою питомою поверхнею та хорошими каталізаторними властивостями. Автори праці [5] розглянули інноваційні методи управління відходами гальванічних виробництв, зосереджуючись на їх використанні, як каталізаторів для контролю забруднення повітря. Вони обговорили різні технології переробки шламів та їх потенціал у зниженні викидів шкідливих газів. Автори роботи [6] досліджували використання шламів для синтезу каталізаторів, які можуть бути ефективно використані в процесах очищення від діоксидів сірки (SO<sub>2</sub>). Вони показали, що каталізатори, отримані з гальванічних шламів, можуть значно покращити процес абсорбції SO<sub>2</sub> у промислових установках.

Також варто відміти, що в праці [7] вивчалися методи комбінування гальванічних відходів з іншими типами промислових відходів, щоб підвищити ефективність каталітичних властивостей. Зокрема у вище вказаній праці показано, що комбіновані каталізатори, створені з гальванічних шламів і відходів металургійних підприємств, мають більш високу стійкість і ефективність у процесах очищення від токсичних газів, порівняно з окремо використаними шламами.

Особливої уваги також заслуговує праця [8], де запропоновано нову техніку використання зібраних відходів для створення багатофункціональних каталітичних матеріалів, що не тільки очищають гази, але й можуть бути використані в процесах деградації важких металів у водних розчинах. Цей підхід дозволяє знижувати не лише газові, але й водні забруднення, що є важливим аспектом для комплексного вирішення проблеми забруднення навколишнього середовища. Автори роботи [9] здійснили дослідження, спрямовані на оцінку довговічності каталітичних властивостей таких матеріалів у реальних умовах промислових установок. Вони виявили, що певні типи каталізаторів з гальванічних шламів демонструють стійкість до деградації протягом кількох років, що робить їх перспективними для промислового застосування.

Окрім цього, важливим є також питання економічної ефективності таких технологій. Робота [10] аналізує витрати на створення та експлуатацію каталізаторів з гальванічних шламів у порівнянні з традиційними методами очищення газів. Автори вказаної вище праці виявили, що хоча початкові витрати на розробку

і виробництво таких каталізаторів є значними, в довгостроковій перспективі вони можуть бути економічно вигіднішими завдяки їх високій ефективності та тривалому терміну служби.

Важливою частиною досліджень є також екологічний аспект використання гальванічних шламів. Вивчення екологічних переваг застосування цих матеріалів для очищення газів показано в праці [11], де вказується, що використання таких каталізаторів дозволяє значно знизити не тільки концентрацію шкідливих газів, але й мінімізувати негативний вплив на навколишнє середовище, що важливо, оскільки переробка шламів у каталізатори дозволяє зменшити відходи, що сприяє збереженню природних ресурсів і зниженню забруднення. Водночас, автори [12] звертають увагу на необхідність подальших досліджень у напрямку підвищення ефективності процесів переробки гальванічних шламів. Вони пропонують використовувати новітні технології, такі як нанотехнології, для створення високопродуктивних каталізаторів з покращеними характеристиками.

Натомість, у праці [13] досліджуються методи безпечної утилізації каталізаторів після завершення їхнього терміну служби. Зокрема, автори вказаної праці розглядають способи переробки та повторного використання матеріалів, що залишаються після експлуатації таких каталітичних систем, для уникнення негативного впливу на навколишнє середовище. Автори підкреслюють важливість створення замкнутих циклів переробки, що дозволяє забезпечити екологічну безпеку протягом усього життєвого циклу матеріалів.

У роботі [14] розглядаються можливості використання відходів гальванічних виробництв для створення багатофункціональних матеріалів, які можуть бути використані в енергетичних або хімічних процесах, таких як виробництво водню або очищення води, що дозволяє не тільки знижувати забруднення, але й створювати нові економічно вигідні шляхи використання відходів.

У роботі [15] досліджують використання нанотехнологій для поліпшення каталізаторних властивостей матеріалів, створених з таких шламів. За допомогою наноструктурованих матеріалів авторам вище вказаної праці вдалося значно збільшити поверхневу активність каталізаторів, що підвищило їх ефективність у процесах очищення промислових газів, таких як окиснення органічних забруднювачів або зниження концентрації оксидів азоту (NOx).

Нанотехнології дозволяють створювати каталізатори з високою специфічною поверхнею та поліпшеною стійкістю до термічних і хімічних змін, що збільшує їхню ефективність і тривалість служби.

Ще одним перспективним напрямком є дослідження синергетичних ефектів від використання комбінованих каталізаторів, що поєднують гальванічні шлами з іншими матеріалами, такими як це відбувається у роботі [16]. Де автори вказаної праці зазначають, що такі комбіновані матеріали можуть демонструвати вищу ефективність у порівнянні з простими каталітичними системами, оскільки вони можуть одночасно виконувати кілька функцій, наприклад, сорбцію і каталітичне окиснення, що дозволяє досягти більш комплексного очищення газових потоків.

Також у роботі [17] розглядаються нові методи інтеграції гальванічних шламів з відновлювальними технологіями, такими як використання каталізаторів для виробництва водню або синтетичних палив. Вони демонструють, що застосування таких матеріалів у водневій енергетиці може стати перспективною альтернативою традиційним методам очищення газів. Оскільки виробництво водню на основі поновлюваних джерел енергії стає все більш важливим у контексті зменшення викидів вуглекислого газу, використання відходів для створення таких каталізаторів може бути вигідним не тільки з екологічної, але й з економічної точки зору.

У роботі [18] розглядаються питання впровадження технологій очищення газів з використанням гальванічних шламів на рівні малих і середніх підприємств. Де автори вказаної праці підкреслюють важливість адаптації технологій до конкретних умов роботи та зменшення витрат на етапі реалізації, що є важливим для забезпечення доступності цих технологій для більш широкого кола промислових виробництв.

Продовжуючи розгляд, важливо зазначити, що ще одним важливим аспектом є оптимізація технологічних процесів, які використовуються для переробки гальванічних шламів у каталізатори. У роботі [19] автори акцентують увагу на важливості інтеграції таких процесів з іншими етапами промислового виробництва для підвищення ефективності та зниження витрат. Вони пропонують концепцію замкнутого циклу, в рамках якого переробка шламів здійснюється паралельно з іншими технологічними операціями, такими як очищення води або

обробка інших відходів. Така інтеграція дозволяє зменшити енергетичні витрати та використання сировини, одночасно забезпечуючи зменшення екологічного навантаження.

У роботі [20] підкреслюється важливість контролю за характеристиками каталізаторів у реальних умовах експлуатації. Автори даної праці описують систему моніторингу, яка дозволяє в реальному часі визначати ефективність роботи каталізаторів, що використовуються для очищення промислових газів. Вони пропонують застосувати сенсорні технології для виявлення концентрацій забруднювачів і швидкої корекції процесів очищення, якщо ефективність каталізатора знижується. Це може допомогти забезпечити сталу ефективність і зменшити ризики для навколишнього середовища.

У сучасних дослідженнях досить значну увагу також привертає питання розробки та впровадження стандартів для використання каталізаторів на основі гальванічних шламів у промисловості. Наприклад авторський колектив праці [21] пропонує науково обґрунтовані рекомендації щодо створення міжнародних стандартів для таких матеріалів. Це включає встановлення вимог до їх якості, ефективності, а також екологічної безпеки на різних етапах їх життєвого циклу та вказують на необхідність спільної роботи між науковими установами, промисловими підприємствами та органами сертифікації для забезпечення широкого застосування таких технологій на міжнародному рівні.

У праці [22] відмічається, що науковці досягли значних успіхів у розробці сучасних підходів до утилізації шламових відходів гальванічних виробництв, зокрема в контексті використання цих відходів як каталізаторів для очищення газових потоків. Протягом останніх десятиліть дослідники зосередилися на створенні ефективних методів утилізації, які не тільки дозволяють знижувати кількість відходів, але й дають змогу отримувати матеріали з високою каталітичною активністю для промислових процесів, зокрема для очищення газів від шкідливих забруднювачів, таких як оксиди азоту (NOx) і сірки (SOx). Зокрема, одним з основних досягнень є розробка технологій, які дозволяють перетворювати шлами з гальванічних виробництв, що містять метали, такі як залізо, мідь, нікель, хром, у каталітичні матеріали. Ці матеріали виявляють високу активність у процесах очищення газів,

при цьому знижуючи кількість токсичних викидів у навколишнє середовище. Наприклад, в праці [23] науковці змогли продемонструвати, що шлами, багаті на окиси металів, можуть бути перетворені на активні каталітичні носії, які ефективно каталізують процеси очищення газових потоків.

Також великий прогрес досягнуто в галузі застосування нанотехнологій для створення каталітичних матеріалів з шламів [24]. Наночастки металів, отримані з шламових відходів, мають значно більшу площу поверхні та високу активність у процесах каталізу, що робить їх ефективними для очищення газів. У результаті досліджень було виявлено, що такі матеріали можуть мати переваги в порівнянні з традиційними каталітичними матеріалами завдяки своїй високій ефективності та меншому витратам на їх виробництво в порівнянні з дорогоцінними металами, які традиційно використовуються в каталізі.

Згідно праці [25] з точки зору технологічних досягнень, науковці також розробили нові методи регенерації каталітичних матеріалів, що дозволяє зменшити витрати на їх виробництво і підвищити довговічність каталітичних систем, що включає впровадження методів термічної активації, механічної активації та біологічних процесів, що допомагають досягти високої ефективності очищення газів при збереженні економічної вигоди.

Однак, незважаючи на досягнення в розробці нових технологій, науковці стикаються з кількома викликами. Одним із них є варіативність складу шламів гальванічних виробництв, що ускладнює стандартизацію процесів утилізації та виготовлення каталітичних матеріалів. Крім того, токсичність деяких металів, таких як хром, може створювати додаткові екологічні проблеми під час утилізації шламів, що потребує особливих заходів контролю та утилізації цих елементів.

Ще однією важливою проблемою є висока вартість деяких каталітичних матеріалів, отриманих за допомогою нанотехнологій, що обмежує їх широке застосування в промисловості [26]. У зв'язку з цим, науковці продовжують працювати над зниженням вартості цих матеріалів через вдосконалення технологій синтезу та розробку нових матеріалів на основі менш дорогих металів або їх сполук.

У майбутньому очікується подальший розвиток методів, які дозволяють зробити процеси утилізації шламів більш екологічними

та економічно вигідними [2, 26]. Вдосконалення технологій на основі біотехнологічних та нанотехнологічних підходів, а також пошук нових каталізаторів та методів регенерації каталітичних матеріалів можуть значно покращити ефективність очищення газів і знизити негативний вплив на навколишнє середовище. Технології з переробки шламів гальванічних виробництв як каталізаторів для очищення газових потоків мають великий потенціал для впровадження в промисловість, однак для цього необхідно вирішити низку технічних, економічних та екологічних проблем.

Таким чином, використання гальванічних шламів для створення каталізаторів для очищення газів є перспективним напрямком у галузі екології та промислових технологій. Водночас, для забезпечення їх широкого застосування необхідно продовжувати дослідження в напрямку покращення технологій переробки, підвищення ефективності каталітичних систем, забезпечення їх екологічної безпеки та економічної доцільності. Це дозволить створити більш сталу і ефективну модель переробки промислових відходів, яка буде вигідною як для промисловості, так і для навколишнього середовища.

У розглянутих працях демонструється значний прогрес у дослідженнях щодо утилізації шламових відходів гальванічних виробництв та їх використання як каталізаторів для очищення газових потоків. Однак, для широкомасштабного впровадження цих технологій необхідні подальші дослідження, спрямовані на оптимізацію процесів переробки

та підвищення ефективності отриманих каталізаторів.

Згідно з [1, 13, 19] гальванічні шлами, що містять значну кількість заліза (Fe), хрому (Cr) та цинку (Zn), є важливим джерелом вторинної сировини для металургії та хімічної промисловості. Ці відходи утворюються в процесі електрохімічного покриття, де метали осаджуються на поверхню виробів, а їхні надлишки накопичуються у відходах у вигляді оксидів, гідроксидів та комплексних сполук. Основною проблемою таких відходів є їх токсичність, оскільки сполуки хрому (особливо Cr (VI)) та цинку можуть мати негативний вплив на довкілля та здоров'я людини.

Для утилізації залізовмісних, хромовмісних та цинковмісних гальванічних шламів використовуються різні технології вилуговування, зокрема кислотне та лужне вилуговування. Залізо може бути переведене у розчинну форму за допомогою кислотного вилуговування з подальшим осадженням у вигляді оксидів, які можуть бути використані в цементній промисловості, або для отримання пігментів [10]. Хром, особливо у формі Cr (VI), піддається хімічному відновленню до менш токсичного Cr (III), який можна вилучати за допомогою селективних осаджувачів. Цинк, що часто присутній у вигляді гідроксидів, ефективно витягується комплексоутворюючими реагентами або електролізом для повторного використання в гальванотехнічних процесах [17].

У таблицях 1-2 наведено результати огляду традиційних та сучасних технологій утилізації шламових відходів гальванічних виробництв.

Таблиця 1

#### Результати огляду традиційних технологій утилізації шламових відходів гальванічних виробництв

Метод	Традиційні технології	Сучасні технології
Термічна обробка	Спалювання або випалювання для зменшення об'єму відходів.	Плазмова обробка з контролем температури для отримання активних каталізаторів.
Хімічна обробка	Осадження гідроксидів металів, нейтралізація кислотою.	Селективна екстракція металів із шламів для отримання каталізаторів.
Сорбційні методи	Використання природних адсорбентів (глина, активоване вугілля).	Наноструктуровані сорбенти для підвищення ефективності очищення газових потоків.
Біотехнологічні методи	Біосорбція важких металів за допомогою мікроорганізмів.	Генно-модифіковані бактерії для ефективного вилучення металів із шламів.
Механохімічна активація	Просте подрібнення для збільшення реакційної здатності.	Використання ультразвуку, мікрохвильових технологій для покращення каталітичних властивостей.
Гідрометалургійний метод	Використання кислотного або лужного вилуговування для розчинення металів.	Селективне вилуговування з використанням хелатуючих агентів, електрохімічного вилучення металів або застосування комплексоутворюючих реагентів.

Таблиця складена автором на основі [1, 4, 10]

Таблиця 2

**Результати огляду сучасних технологій утилізації шламових відходів гальванічних виробництв**

Технологія	Опис	Переваги	Недоліки	Приклади застосування
Термічна активація	Процес нагрівання шламів до високих температур для активації каталізаторних властивостей металів.	Покращення каталізаторних властивостей матеріалу, зниження токсичності відходів.	Висока енергетична витратність, потребує спеціалізованого обладнання.	Очищення газів від NOx, SOx.
Гідротермічна обробка	Використання води або водних розчинів для активації каталізаторів у присутності високого тиску та температури.	Менші енергетичні витрати, більш екологічний процес.	Необхідність в інвестиціях у спеціалізовані реактори, складність контролю.	Переробка важких металів у каталізатори.
Хімічна активація	Використання кислот або лужних розчинів для перетворення важких металів у активні каталізаторні форми.	Простота застосування, доступність реагентів.	Корозія обладнання, необхідність у нейтралізації залишкових хімікатів.	Обробка шламів для подальшого використання в очищенні газів.
Біохімічна обробка	Використання мікроорганізмів для переробки токсичних металів у безпечні форми.	Екологічна безпека, низька енергетична витратність.	Часова залежність, обмеження на кількість важких металів.	Витягування металів з відходів і перетворення їх у каталізатори.
Гідрометалургійна переробка	Розчинення металів у кислому або лужному середовищі, їх подальше селективне осадження або електрохімічне виділення.	Висока ефективність вилучення металів, можливість переробки різних типів шламів.	Необхідність утилізації відпрацьованих розчинів, можливі екологічні ризики.	Отримання чистих металів для подальшого використання.

Таблиця складена автором на основі [1, 4, 10]

Таблиця 3

**Результати аналізу порівняння ефективності різних методів утилізації шламів гальванічних виробництв**

Метод утилізації	Потрібна температура, °C	Час обробки, години	Вихідний каталізатор	Ефективність очищення NOx, %	Ефективність очищення SOx, %	Вартість (на 1 кг відходів), \$
Термічна обробка	800-1200	1-2	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , CuO	85	80	2.50
Хімічна екстракція	20-80	4-6	NiO, Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	75	65	3.00
Механохімічна активація	300-500	2-4	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , Co <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	90	85	4.20
Біотехнологічні методи	25-35	24-48	CuO, Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	70	60	1.80
Нанотехнології	200-500	0.5-1	Ag <sub>2</sub> O, PdO	95	90	5.50

Таблиця складена автором на основі [2, 13, 14]

З табл.1-2 слідує, що сучасні методи (плазмова обробка, селективна екстракція металів, наноструктуровані сорбенти) є більш ефективними, екологічними та дозволяють отримувати корисні каталізатори, на відміну від традиційних методів (захоронення, термічна обробка), які створюють додаткові ризики для довкілля.

У табл. 3. наведено результати аналізу порівняння ефективності різних методів утилізації шламів гальванічних виробництв.

З табл. 3. слідує, що найбільш ефективними методами є механохімічна активація та використання нанотехнологій, які дають максимальну ефективність очищення NOx (до 95%) та SOx (до 90%), хоча вони є дорожчими порівняно з біотехнологічними методами, які мають нижчу ефективність, але є економічнішими.

У табл. 4. наведено склад шламів гальванічних виробництв і можливі каталізатори.

Таблиця 4

**Склад шламів гальванічних виробництв і можливі каталізатори**

Тип шламу	Вміст металу (%)	Потенційний каталізатор	Каталізатор після обробки	Ефективність каталізу (NOx, %)	Ефективність каталізу (CO <sub>2</sub> , %)
Залізо (Fe)	40-50	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	85	80
Мідь (Cu)	15-20	CuO	Cu <sub>2</sub> O	80	75
Нікель (Ni)	10-15	NiO	Ni <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	70	65
Хром (Cr)	5-10	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Cr <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	90	85
Інші метали	5-10	(Змішані оксиди)	(Змішані оксиди)	80	70

Таблиця складена автором на основі [5, 8, 11]

Таблиця 5

**Властивості сучасних каталізаторів, виготовлених із шламових відходів**

Тип каталізатора	Основний компонент	Спосіб активації	Властивості каталізатора	Приклад застосування
Каталізатори на основі заліза	Залізо (Fe)	Термічна активація, гідротермічна обробка	Висока активність при очищенні газів від NOx	Очищення газів від оксидів азоту (NOx)
Каталізатори на основі міді	Мідь (Cu)	Хімічна активація, використання кислотних розчинів	Стабільність при високих температурах, ефективність при очищенні від CO	Очищення вихлопних газів автомобілів
Каталізатори на основі нікелю	Нікель (Ni)	Термічна активація, хімічна активація	Знижена токсичність, висока активність в процесах гідрогенізації	Очищення газових потоків від сірки (SOx)
Біокаталізатори	Метали в органічних сполуках	Біохімічна обробка	Екологічна безпека, здатність розкладу важких металів	Переробка важких металів в екологічно безпечні форми

Таблиця складена автором на основі [5, 8, 11]

Таблиця 6

**Результати порівняння каталітичних властивостей наночасток металів з шламів у процесі очищення газових потоків**

Каталізатор	Тип металу	Розмір часток, нм	Вартість (на 1 кг), \$	Ефективність очищення NOx, %	Ефективність очищення SOx, %	Стійкість при високих температурах
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	Залізо	10-50	4.00	90	85	Висока
CuO	Мідь	5-10	6.00	80	75	Середня
NiO	Нікель	2-5	5.50	85	80	Середня
PdO	Паладій	1-3	10.00	95	90	Дуже висока
Ag <sub>2</sub> O	Срібло	5-10	8.00	85	80	Висока

Таблиця складена автором на основі [12, 13]

У табл. 5 описані сучасні каталізатори, їх властивості та наведені приклади їх практичного використання.

З табл. 5. наочно видно, що основними металами у шламах є залізо, мідь, нікель і хром, з яких після відповідної обробки утворюються активні каталізатори, такі як Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, Cu<sub>2</sub>O, Ni<sub>2</sub>O<sub>3</sub> і Cr<sub>3</sub>O<sub>8</sub>, з ефективністю каталізу NOx до 90% і CO<sub>2</sub> до 85%.

У табл. 6. наведено результати порівняння каталітичних властивостей наночасток металів з шламів у процесі очищення газових потоків.

З табл. 6. слідує, що наночастинки паладію (PdO) та срібла (Ag<sub>2</sub>O) мають найвищу ефективність очищення NOx (95%) і SOx (90%), однак їх вартість значно вища, ніж у заліза або міді, що обмежує їх широкомасштабне використання.

Каталізатори, отримані з шламових відходів гальванічних виробництв, демонструють значний потенціал у процесах очищення газових потоків. Вони можуть бути отримані різними методами активації, такими як термічна, хімічна, гідротермальна обробка або нанотехнологічна модифікація, що дозволяє

створювати ефективні матеріали для промислового застосування.

Оксиди заліза ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) отримуються шляхом термічної активації шламів при температурах 800-1200°C і застосовуються для очищення газів від оксидів азоту ( $\text{NO}_x$ ) та оксидів сірки ( $\text{SO}_x$ ). Вони демонструють ефективність 85-90%, що робить їх перспективними для промислового використання. Оксиди міді ( $\text{CuO}$ ,  $\text{Cu}_2\text{O}$ ) отримують за допомогою хімічної активації шляхом обробки кислотними розчинами. Вони ефективно застосовуються для видалення вуглекислого газу ( $\text{CO}_2$ ) та очищення вихлопних газів автомобілів, маючи високу стабільність при високих температурах.

Оксиди нікелю ( $\text{NiO}$ ,  $\text{Ni}_2\text{O}_3$ ) отримуються методами термічної або хімічної активації та використовуються в процесах гідрогенізації та очищення газів від сірководню ( $\text{H}_2\text{S}$ ). Хоча ці каталізatori є досить ефективними, вони мають знижені екологічні показники через потенційну токсичність нікелю, що потребує додаткового контролю. Оксиди хрому ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Cr}_3\text{O}_8$ ) отримують за допомогою гідротермальної обробки, що дозволяє створювати каталізatori з високою питомою поверхнею та високою ефективністю у каталізі  $\text{NO}_x$  (до 90%).

Нанотехнологічна обробка шламів дозволяє отримати каталізatori у вигляді наночастинок металів, що забезпечує значно підвищену

поверхневу активність. Завдяки цьому вони ефективні в високотемпературних процесах очищення газових потоків. Наприклад, паладій ( $\text{PdO}$ ) демонструє ефективність до 95% при видаленні  $\text{NO}_x$ . Окрему групу становлять біокаталізatori, які створюються за допомогою біохімічної обробки із застосуванням мікроорганізмів, що модифікують важкі метали у менш токсичні та більш активні форми. Цей метод є найбільш екологічно безпечним, однак потребує тривалого часу для активації каталізatori.

У результаті, різні методи обробки шламів дозволяють отримувати ефективні каталізatori для очищення промислових газових потоків, зменшуючи екологічне навантаження та відкриваючи нові можливості для утилізації відходів.

У табл. 7. наведено результати порівняння характеристик термічної обробки шламів гальванічних виробництв для очищення газів.

З табл. 7. слідує, що підвищення температури обробки каталізatori збільшує їхню ефективність у видаленні  $\text{NO}_x$  та  $\text{SO}_x$ , проте при цьому зростає вартість процесу та енергоспоживання, що може бути проблемою для масового впровадження.

У табл. 8. наведено результати порівняння екологічної ефективності біотехнологічних методів утилізації шламів для очищення газів.

Таблиця 7

**Результати порівняння характеристик термічної обробки шламів гальванічних виробництв для очищення газів**

Температура обробки, °C	Час обробки, години	Вихідний матеріал	Очищення $\text{NO}_x$ , (%)	Очищення $\text{SO}_x$ , (%)	Очищення $\text{CO}_2$ , %	Вартість процесу (на 1 кг), \$
800	1	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	85	80	70	3,00
1000	2	$\text{CuO}$	80	75	65	3,50
1200	3	$\text{NiO}$	70	60	50	4,00
900	1,5	$\text{Cr}_2\text{O}_3$	90	85	80	3,20

Таблиця складена автором на основі [11, 13, 16]

Таблиця 8

**Результати порівняння екологічної ефективності біотехнологічних методів утилізації шламів для очищення газів**

Метод біотехнології	Вартість (на 1 кг), \$	Час обробки, дні	Вихідний каталізатор	Очищення $\text{NO}_x$ , %	Очищення $\text{SO}_x$ , %	Очищення $\text{CO}_2$ , %
Використання бактерій	1,80	24-48	$\text{CuO}$ , $\text{Fe}_2\text{O}_3$	70	60	50
Використання грибів	2,00	48-72	$\text{CuO}$ , $\text{NiO}$	75	65	55

Таблиця складена автором на основі [12, 15]

Таблиця 9

**Результати оцінки ефективності методів утилізації шламів для очищення газових потоків**

Метод утилізації	Оцінка ефективності, %	Витрати енергії (кВт·год/м <sup>3</sup> газу)	Зниження концентрації забруднень, %	Температурний режим, °С	Примітки
Термічна активація	85-95	3-6	70-80	600-1000	Підвищена енергоефективність за умови використання відновлювальних джерел енергії
Гідротермічна обробка	70-85	2-4	60-75	250-450	Зниження енергетичних витрат за рахунок використання нових каталізаторів
Хімічна активація	60-75	1,5-3	50-65	100-200	Використання зелених реагентів дозволяє знизити токсичність
Біохімічна обробка	40-55	0,5-1	30-45	25-40	Потенційно перспективна для малих обсягів газів, обмежена швидкість процесу

Таблиця складена автором на основі [1, 4, 10].

Таблиця 10

**Результати аналізу перспективи розвитку технологій утилізації шламів для очищення газових потоків**

Технологія	Перспективи розвитку	Вплив на енергоефективність, %	Оцінка зниження забруднень, %	Прогнозована вартість за одиницю очищення газу, \$/м <sup>3</sup>	Прогнозоване збільшення ефективності через 5 років, %
Термічна активація	Використання відновлювальних джерел енергії, удосконалення каталізаторів	+10-15	80-90	1.5-2.5	15-20
Гідротермічна обробка	Оптимізація температурних режимів, застосування нових матеріалів для реакторів	+5-10	70-85	1-1.5	10-15
Хімічна активація	Застосування зелених хімікатів, автоматизація процесу	+5-8	60-75	0.8-1.5	8-12
Біохімічна обробка	Генетична модифікація мікроорганізмів, розробка нових біокаталізаторів	+3-5	30-50	0.5-0.8	20-30

Таблиця складена автором на основі [6, 13, 20]

З табл. 8 слідує, що використання бактерій та грибів для утилізації шламів є найбільш екологічно чистим методом, проте він потребує значного часу (до 72 годин) і має нижчу ефективність очищення NO<sub>x</sub> (70-75%) порівняно з термічною або механохімічною активацією.

У табл. 9 наведено результати оцінки ефективності методів утилізації шламів для очищення газових потоків.

З табл. 9 слідує, що термічна активація та механохімічні методи мають найвищий рівень ефективності очищення (до 95%), проте вони потребують значних енергетичних витрат, тоді як біохімічні методи є менш енерговитратними, але значно менш ефективними.

У табл. 10 наведено результати аналізу перспективи розвитку технологій утилізації шламів для очищення газових потоків.

З табл. 10. слідує, що найбільший потенціал має застосування відновлюваних джерел енергії, автоматизація процесів та використання нових матеріалів (зокрема нанокаталізаторів), що може збільшити ефективність технологій на 15-30% у найближчі 5 років, при цьому знизивши вартість очищення газів.

Сучасні методи переробки шламів також включають використання плазмових технологій та гідрометалургійних підходів, що дозволяють отримувати високочисті метали та їхні сполуки [19]. Зокрема, гідрометалургія забезпечує ефективне вилучення заліза, хрому та цинку без значних енергетичних витрат у порівнянні з пірометалургійними методами. Крім того, застосування наноструктурованих сорбентів та біотехнологічних методів дає змогу більш ефективно очищати шлами від небезпечних домішок, що відкриває нові перспективи для їх безпечної утилізації та рециклінгу.

Таким чином, отримані результати демонструють, що використання шламових відходів гальванічних виробництв як каталізаторів є перспективним напрямком для очищення газових потоків. Аналіз порівняльних даних показав, що сучасні методи активації, такі як механохімічна та нанотехнологічна обробка, значно підвищують ефективність каталізаторів, зокрема для видалення NOx та SOx. Водночас, термічна активація залишається однією з найефективніших технологій, хоча потребує високих енергетичних витрат. Дослідження складу шламів показало, що основними металами, які можуть бути використані як каталізатори, є залізо, мідь, нікель і хром. Вони утворюють активні оксидні сполуки після відповідної обробки, що дозволяє ефективно очищати газові потоки. При цьому наночастинки паладію та срібла демонструють найвищу ефективність очищення, проте їхня висока вартість обмежує широке промислове застосування. Оцінка екологічної ефективності технологій показала, що біотехнологічні методи, хоча й мають нижчу ефективність порівняно з хімічними чи термічними, є найбільш безпечними для навколишнього середовища та перспективними для малих і середніх підприємств. Водночас, перспективи розвитку технологій вказують на можливість підвищення ефективності каталізаторів через інтеграцію відновлюваних джерел енергії та використання нових матеріалів, що може суттєво знизити витрати на очищення газів.

Загалом результати підтверджують, що подальше вдосконалення технологій утилізації

шламів дозволить не лише зменшити забруднення, а й створити ефективні та економічно доцільні каталізатори, що сприятиме екологічній модернізації промисловості.

**Висновки.** Проведене дослідження підтвердило перспективність використання шламових відходів гальванічних виробництв як каталізаторів для очищення газових потоків. Аналіз сучасних методів утилізації показав, що найбільш ефективними є механохімічна активація та нанотехнологічна модифікація, які забезпечують високий рівень очищення оксидів азоту (NOx) та сірки (SOx). Термічна активація залишається одним із найбільш дієвих методів, хоча потребує значних енергетичних витрат.

Основними металами, що містяться у шламах і можуть бути використані для отримання каталізаторів, є залізо, мідь, нікель та хром. Їхня обробка дозволяє отримувати ефективні каталізатори, придатні для промислового застосування. Водночас, хоча наночастинки паладію та срібла демонструють максимальну ефективність, їх висока вартість обмежує широке використання.

Екологічна оцінка технологій показала, що біотехнологічні методи, попри нижчу ефективність, є більш безпечними для навколишнього середовища та перспективними для малих підприємств. Подальші дослідження мають бути спрямовані на оптимізацію технологічних процесів, підвищення ефективності каталізаторів та зниження витрат на їх виробництво. Інтеграція відновлюваних джерел енергії та застосування новітніх матеріалів сприятимуть екологічній модернізації промисловості та розвитку циркулярної економіки.

#### Л і т е р а т у р а

1. A comprehensive overview of methods involved in nanomaterial production and waste disposal from research labs and industries and existing regulatory guidelines for handling engineered nanomaterials / S. Dhall et al. *Environmental chemistry and ecotoxicology*. 2024. Vol. 6, P. 34-39 URL: <https://doi.org/10.1016/j.enceco.2024.06.002>
2. Activation of peroxymonosulfate by boron carbide modified biochar catalyst derived from waste sludge for the removal of organic pollutants / G. Li et al. *Separation and purification technology*. 2024. P.131-319. URL: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2024.131319>
3. Sludges for soil disposal of excess activated sludge from the industrial waste treatment plant at companhia alcoolquímica nacional / R. Francisco et

- al. *Water science and technology*. 1987. Vol. 19, no. 8. P. 127–137. URL: <https://doi.org/10.2166/wst.1987.0051>
4. Biodegradation of total petroleum hydrocarbons from acidic sludge produced by re-refinery industries of waste oil using in-vessel composting / A. Asgari et al. *Journal of environmental health science and engineering*. 2017. Vol. 15, no. 1. P. 117–127. URL: <https://doi.org/10.1186/s40201-017-0267-1>
  5. Chan G. Y.S., Chu L. M., Wong M. H. Effects of leachate recirculation on biogas production from landfill co-disposal of municipal solid waste, sewage sludge and marine sediment. *Environmental pollution*. 2002. Vol. 118, no. 3. P. 393–399. URL: [https://doi.org/10.1016/s0269-7491\(01\)00286-x](https://doi.org/10.1016/s0269-7491(01)00286-x)
  6. Co-hydrothermal gasification of *Scenedesmus* sp. with sewage sludge for bio-hydrogen production using novel solid catalyst derived from carbon-zinc battery waste / J. Arun et al. *Bioresource technology reports*. 2020. Vol. 11. P. 100–129. URL: <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2020.100459>
  7. Design of store-release covers to minimize deep drainage in the mining and waste-disposal industries: results from a modelling analyses based on ecophysiological principles / D. Eamus et al. *Hydrological processes*. 2012. Vol. 27, no. 26. P. 3815–3824. URL: <https://doi.org/10.1002/hyp.9482>
  8. Esterification of fatty acid from palm oil waste (sludge oil) by using alum catalyst / T. Usman et al. *Indonesian journal of chemistry*. 2010. Vol. 9, no. 3. P. 491–499. URL: <https://doi.org/10.22146/ijc.21522>
  9. Fatty acid methyl ester (FAME) production from sludge solid waste as  $K_2O/SiO_2$  catalyst / S. Peranginangin et al. *Case studies in chemical and environmental engineering*. 2024. P. 100–133. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2024.100933>
  10. Influence of phosphorus on the  $NH_3$ -SCR performance of  $CaO_2$ - $TiO_2$  catalyst for NO removal from co-incineration flue gas of domestic waste and municipal sludge / J. Cao et al. *Journal of colloid and interface science*. 2022. Vol. 610. P. 463–473. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2021.11.013>
  11. Investigation of thermodynamic parameters, combustion, and emissions of produced biodiesel fuel (from waste oil by heterogeneous nano-catalyst of stone cutting factory sludge) and its combination with diesel fuel / G. Widjaja et al. *Journal of thermal analysis and calorimetry*. 2023. URL: <https://doi.org/10.1007/s10973-023-12270-6>
  12. Kumari J. Isolation and screening for MDR bacteria, isolated from waste disposal sites of hospital and pharmaceutical industries of himachal pradesh. *African journal OF biomedical research*. 2024. P. 4729–4737. URL: <https://doi.org/10.53555/ajbr.v27i4s.4465>
  13. Marble processing effluent treatment sludge in waste poly (ethylene terephthalate) pyrolysis as catalyst–II: recovery from pyrolytic fluids / G. Ahmetli et al. *International journal of environmental science and technology*. 2024. P. 211–231. URL: <https://doi.org/10.1007/s13762-023-05388-5>
  14. Mwenge P., Rutto H., Enweremadu C. Production of biodiesel using calcined brine sludge waste from chor-alkali industry as a heterogeneous catalyst. *Environmental and climate technologies*. 2021. Vol. 25, no. 1. P. 621–630. URL: <https://doi.org/10.2478/rtuect-2021-0046>
  15. Performance of NiO doped on alkaline sludge from waste photovoltaic industries for catalytic dry reforming of methane / M. R. Shamsuddin et al. *Environmental science and pollution research*. 2024. URL: <https://doi.org/10.1007/s11356-024-33325-7>
  16. Processing of metal waste–sludge from the galvanizing plants / J. Drápala et al. *Metals*. 2022. Vol. 12, no. 11. P. 19–47. URL: <https://doi.org/10.3390/met12111947>
  17. Recovery of Cr from chrome-containing leather waste and its utilization as reinforcement along with waste spent alumina catalyst and grinding sludge in AA 5052-based metal matrix composites / S. P. Dwivedi et al. *Proceedings of the institution of mechanical engineers, part E: journal of process mechanical engineering*. 2021. P. 095440892110383. URL: <https://doi.org/10.1177/09544089211038385>
  18. Selective production of aromatics from waste plastic pyrolysis by using sewage sludge derived char catalyst / K. Sun et al. *Journal of cleaner production*. 2020. Vol. 268. P. 122–138. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122038>
  19. Sludge recycling from non-lime purification of electrolysis wastewater: bridge from contaminant removal to waste-derived NOX SCR catalyst / J. Gao et al. *Catalysts*. 2024. Vol. 14, no. 8. P. 535–543. URL: <https://doi.org/10.3390/catal14080535>
  20. The use of metallurgical waste sludge as a catalyst in hydrogen production from sodium borohydride / E. Fangaj et al. *International journal of hydrogen energy*. 2020. Vol. 45, no. 24. P. 13322–13329. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.03.043>
  21. Tini Surtiningsih N. H. Removal of heavy metals pb, zn and cu from sludge waste of paper industries using biosurfactant. *Journal of bioremediation & biodegradation*. 2014. Vol. 05, no. 07. P. 343–356. URL: <https://doi.org/10.4172/2155-6199.1000255>
  22. Waste-to-BioEnergy pathway for waste activated sludge from food processing industries: An experiment on the valorization potential under  $CO_2$  and  $N_2$  atmospheres through microwave-induced pyrolysis / G. R. Mong et al. *Fuel*. 2022. Vol. 323. P. 124–138. URL: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.124380>

23. Waste to catalyst: synthesis of catalysts from sewage sludge of the mining, steel, and petroleum industries / G. Castro-León et al. *Sustainability*. 2020. Vol. 12, no. 23. P. 98–109. URL: <https://doi.org/10.3390/su12239849>
24. Zinc stearate from galvanizing waste materials and its use as thermal stabilizer in PVC industries / F. Rony et al. *Bangladesh journal of scientific and industrial research*. 2016. Vol. 51, no. 4. P. 261–270. URL: <https://doi.org/10.3329/bjsir.v51i4.30443>
25. ZnS modified N, S dual-doped interconnected porous carbon derived from dye sludge waste as high-efficient ORR/OER catalyst for rechargeable zinc-air battery / Y. Peng et al. *Journal of colloid and interface science*. 2022. Vol. 616. P. 659–667. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2022.02.102>
26. ZnS modified N, S dual-doped interconnected porous carbon derived from dye sludge waste as high-efficient ORR/OER catalyst for rechargeable zinc-air battery / Y. Peng et al. *Journal of colloid and interface science*. 2022. Vol. 616. P. 659–667. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2022.02.102>

**Shmyhol S.O., Stoliarenko H.S. Modern approaches to the utilization of sludge waste from electroplating industries as catalysts for gas stream purification: a review of technologies and prospects**

*An analysis of modern technologies for the utilization of sludge waste from electroplating industries and their use as catalysts for gas stream purification has been conducted. The relevance of the study is due to the growing volume of industrial waste and the need to develop environmentally safe and economically feasible methods of its processing. In this context, special attention is paid to technologies that allow converting sludge waste from electroplating industries not only into by-products, but also into useful catalysts for gas stream cleaning processes. The purpose of the article is to review current approaches to the utilisation of sludge waste from electroplating, in particular, through its use as catalysts for the purification of gas streams. The study involved a systematic analysis of scientific sources, experimental studies of the catalytic properties of*

*materials derived from sludge waste, and a comparative analysis of the economic and environmental parameters of various disposal methods. The main results of the work include an assessment of the effectiveness of various approaches, including thermal, chemical and biotechnological treatment of sludge, as well as the use of nanotechnology to enhance the activity of catalysts. It was found that the best methods are those that provide high catalytic activity at minimal energy consumption. An environmental assessment of modern sludge processing technologies is carried out. It is determined that biotechnological methods of processing are safer for the environment and more promising for small enterprises. The integration of renewable energy sources and the use of the latest materials will contribute to the ecological modernisation of industry and the development of a circular economy. Further research should be aimed at optimising technological processes, improving the efficiency of catalysts and reducing production costs. The integration of renewable energy sources and the use of the latest materials will contribute to the ecological modernisation of industry and the development of the circular economy. The results obtained can be useful for industrial enterprises in choosing waste treatment technologies and improving air purification systems, contributing to the development of environmental safety.*

**Keywords:** utilization, sludge waste, electroplating industries, catalysts, gas stream purification, thermal treatment, chemical activation, biotechnological methods, nanotechnology, environmental safety.

**Шмиголь Сергій Олегович** – здобувач третього (освітньо-наукового рівня (PhD)) Черкаського державного технологічного університету. [s.shmyhol@gmail.com](mailto:s.shmyhol@gmail.com)

**Столяренко Геннадій Степанович** – д.т.н., професор, завідувач кафедри хімічних технологій та водочищення Черкаського державного технологічного університету. [radikal@ukr.net](mailto:radikal@ukr.net).

Стаття подана 5.05. 2025.

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-291-5-109-120>

УДК 544.7

## A REVIEW OF FABRICATION TECHNIQUES FOR SUPERHYDROPHOBIC COATINGS

Yong Z., Baklan D.V.

## ОГЛЯД ТЕХНОЛОГІЙ ВИГОТОВЛЕННЯ СУПЕРГІДРОФОБНИХ ПОКРИТТІВ

Юн Ц., Баклан Д.В.

*Superhydrophobic surfaces have emerged as a pivotal focus of modern materials science. These surfaces are notable for their unique wetting behavior and wide array of potential applications in fields such as self-cleaning coatings, anti-corrosion protection, drag reduction, anti-icing technologies, and oil-water separation. Inspired by natural models such as lotus leaves, water striders, and *Salvinia molesta*, these surfaces combine low surface energy materials with hierarchical micro/nanostructures to achieve water contact angles exceeding 150°. This dual scale roughness traps air pockets beneath water droplets, enabling the "lotus effect," whereby droplets roll off surfaces, removing contaminants. The development of superhydrophobic coatings is particularly important in the context of metal corrosion because economic and environmental factors have created a demand for safer, more sustainable alternatives. A wide variety of fabrication techniques have been developed, including top-down methods, such as laser ablation and etching, and bottom-up strategies, such as sol-gel deposition and chemical vapor deposition. However, many approaches are limited by complexity, cost, scalability, or environmental impact. Furthermore, the practical application of these coatings presents challenges concerning durability, material compatibility, performance under environmental stressors, and the use of fluorinated compounds, which pose ecological risks. This review critically examines current methodologies for fabricating superhydrophobic surfaces. It evaluates the underlying principles, advantages, and limitations of these methods with respect to mechanical robustness, scalability, and application-specific demands. Particular emphasis is placed on the importance of multiscale surface structuring and selecting inherently hydrophobic, low-energy materials to create functionally resilient coatings. Additionally, the work explores the limitations of current testing standards and suggests that a unified framework for evaluating mechanical wear, environmental resistance, and*

*hydrophobic retention is essential for accelerating the transfer of technology from the laboratory to the industrial scale. The review highlights novel strategies such as biomimetic design, incorporating self-healing materials, and integrating superhydrophobic coatings with multifunctional technologies as promising future directions. Ultimately, the success of superhydrophobic surface technologies depends on a multidisciplinary effort balancing performance metrics with environmental responsibility and economic feasibility to unlock their transformative potential across diverse sectors.*

**Ключові слова:** *superhydrophobic coatings, contact angle, surface wettability, surface roughness, water-repellent, fabrication methods.*

**Introduction.** Superhydrophobic surfaces have become a subject of significant interest in material science due to their wide range of applications, including self-cleaning surfaces, anti-fouling, anti-icing, drag reduction, and oil/water separation. These surfaces are inspired by numerous examples in nature, such as the water spider (*Gerris remigis*) that can walk on water surfaces and the *Salvinia molesta* leaves that resist wetting even after weeks of submersion. The most famous example is the lotus leaf, which demonstrates exceptional water-repellent properties and gave rise to the well-known "Lotus effect." The mechanism of the lotus effect was first investigated and described by Barthlott and Neinhuis in 1997 [1].

The development of corrosion-resistant superhydrophobic coatings has gained particular importance in recent years due to the economic and safety concerns associated with metal corrosion. In industrialized countries, corrosion-related costs typically amount to 1–4% of their GDP. Until

recently, chromium-containing coatings were efficiently used for corrosion protection, but these have been restricted due to their harmful effects on humans and the environment. This has led to increased research in environmentally friendly alternatives, including polymeric coatings.

Superhydrophobic surfaces are characterized by their extreme water repellence, which is achieved through a combination of two key factors: the inherent hydrophobicity of the surface material (low surface energy) and surface roughness. Materials with low surface energy naturally repel water because forming a new solid-liquid interface with water is energetically unfavorable [2, 3]. However, the maximum water contact angle (WCA) that can be achieved by a flat, low surface energy material is approximately  $120^\circ$  [4]. To achieve superhydrophobicity, surface roughness must be introduced, which can increase the contact angle to above  $150^\circ$  using the same chemical composition. Furthermore, building a structure with hierarchical roughness (combining dual-scale texture) has been reported to improve both hydrophobicity and surface durability. This approach is observed in nature, such as in the *Salvinia* leaves and water spider legs, and is replicated in synthetic coatings through micro/nanoscale surface structuring.

The Lotus effect describes the self-cleaning mechanism observed on the lotus plant leaf surface [5]. While water droplets slide along a tilted hydrophobic surface, on a superhydrophobic surface, the near-spherical droplets roll across the surface instead. This rolling action enhances the removal of surface contaminants like dirt particles and bacteria. Examining the structure of lotus leaves reveals a waxy surface coating that repels water, combined with complex 3D microstructure textures and an additional layer of smaller-scale hair-like features covering both the surface protrusions and flat regions. These microstructures trap air underneath the water upon wetting the surface, enabling the rolling motion of water droplets. Similar structures are found in the water spider's legs, which feature micro-sized filaments with nano-grooved textures, resulting in dual-scale roughness that contributes to their water-repellent properties. These natural examples highlight the importance of hierarchical structuring in achieving superhydrophobicity, with surfaces often displaying both micro and nanoscale roughness features.

**Task setting.** Despite remarkable advances in laboratory-scale fabrication of superhydrophobic coatings, many existing methods remain complex, costly, or difficult to scale up. In addition, issues related to mechanical durability, environmental

impact, and long-term performance still pose challenges for practical applications. Therefore, a pressing scientific and technological task is to systematize the current strategies for fabricating superhydrophobic surfaces, with a particular focus on their scalability, sustainability, and application-specific suitability. Special attention should be paid to the role of multi-scale structuring and the selection of low-surface-energy materials, which together define the effectiveness and durability of these coatings.

**The aim of the work is to** provide a comprehensive review of current fabrication techniques for superhydrophobic coatings, with a focus on understanding the underlying principles, advantages, limitations, and potential industrial applications of each method. Particular attention is paid to the role of surface chemistry and multi-scale roughness in achieving durable and functional superhydrophobicity.

#### Presentation of the main research material.

Several methods are used to measure and characterize surface wettability. The most common is the water contact angle (WCA) measurement, where the angle is measured from the surface-water contact plane to the tangent line of the water-air interface. Surfaces are categorized based on their WCA values (Fig. 1): superhydrophilic ( $\theta < 10^\circ$ ), hydrophilic ( $10^\circ < \theta < 90^\circ$ ), hydrophobic ( $\theta > 90^\circ$ ), superhydrophobic ( $\theta > 150^\circ$ ) [6]. A maximum contact angle is achieved when the droplet is completely spherical, while a minimum angle occurs when the droplet spreads to completely wet the surface.

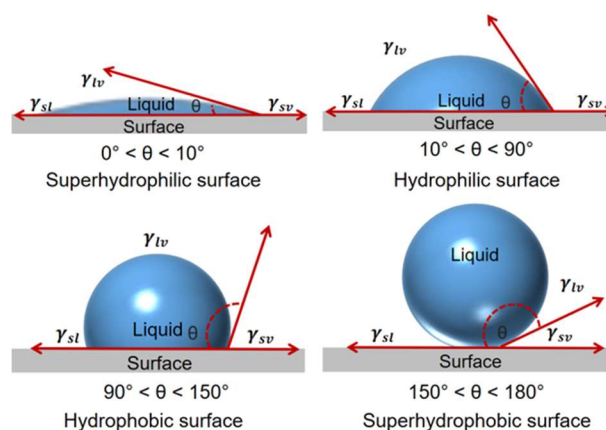


Fig. 1. Illustration of WCA values [6]

#### Fabrication of Superhydrophobic Surfaces.

Fabrication methodologies for superhydrophobic surfaces are categorically divided into two principal approaches: top-down and bottom-up methods [7]. The top-down methodology entails the structural

modification of bulk material surfaces to generate roughness. This is accomplished through various surface topography alteration techniques, including lithography, etching, and laser treatment processes. Conversely, bottom-up methodologies facilitate surface roughness through the addition of small-scale materials. Implementation occurs via deposition techniques such as chemical vapor deposition, electroplating, and sol-gel processing. It should be noted that certain deposition procedures do not inherently yield rough surfaces; consequently, supplementary treatment of precursor materials or the deposited surface may be requisite to achieve the desired roughness characteristics. The determination of appropriate fabrication approaches and specific techniques is contingent upon the selected base materials, desired surface properties, and intended application parameters. Advanced superhydrophobic surface development frequently incorporates multiple fabrication phases, integrating both top-down and bottom-up elements to attain optimal surface characteristics. Fig. 2 illustrates the two primary fabrication approaches for superhydrophobic surfaces. This section will examine these methodologies in sequence as depicted in the figure, beginning with 'top-down' techniques before exploring 'bottom-up' approaches that employ deposition to create surface roughness. Subsequently, we will briefly address deposition methods that do not require rough morphology development, highlighting general material treatment techniques that have been documented in combination with these deposition processes. It should be emphasized that this represents a simplified overview of the documented methodologies; in practice, many sophisticated fabrication techniques incorporate multiple approaches simultaneously, with their selection dependent on the specific surface design requirements and intended application.

Top-down approaches involve structuring bulk substrates to produce rough morphology, which is essential for achieving superhydrophobicity. This can be achieved through the selective removal of hard materials or by imprinting soft materials using mold. Common top-down techniques include laser process, etching, galvanic corrosion, lithography, template imprinting [8].

**Laser processing.** Ultrafast lasers, particularly femtosecond lasers [9], offer a precise method for fabricating micro- and nanostructured surfaces. This technique allows for the fabrication of superhydrophobic surfaces without the need for additional coatings or surface treatments. Laser ablation can induce chemical and structural changes to the surface of materials, enhancing their water repellency [10]. Ta et al. [11] conducted a comprehensive investigation into the fabrication of superhydrophobic surfaces on 304S15 stainless steel using nanosecond fiber laser systems, showcasing a cost-effective alternative to pico- and femtosecond laser technologies. Through direct laser texturing, they achieved superhydrophobic properties, with water contact angles of approximately 154° and contact angle hysteresis as low as 4°. The study revealed that laser-induced surface roughness amplified hydrophilic behavior initially, but the surfaces transitioned to superhydrophobicity after exposure to ambient conditions for 13–18 days. This wettability change is attributed to chemical modification and decomposition processes involving carbon dioxide and magnetite. Long et al. [12] utilized femtosecond laser irradiation to fabricate superhydrophobic copper surfaces with tunable water adhesion properties, inspired by the contrasting wetting behaviors of lotus leaves and rose petals. By varying the laser scanning speed (10–200 mm/s), the researchers precisely controlled surface topographies, ranging from deep microstructures to shallower formations. Post-treatment chemical modification enhanced hydrophobicity, enabling surfaces to transition between Cassie and Wenzel wetting states based on microstructural depth. Low-speed laser treatments resulted in surfaces with minimal water adhesion, exhibiting self-cleaning properties akin to lotus leaves, while high-speed treatments created surfaces with significant water adhesion, resembling rose petals. These surfaces demonstrated adjustable water contact angles (up to 159°) and sliding angles (from <math><10^\circ</math> to 90°), alongside varied adhesion forces (10 μN to 110 μN). Applications of this technique include liquid manipulation and self-cleaning technologies, highlighting its cost-effectiveness and precision in

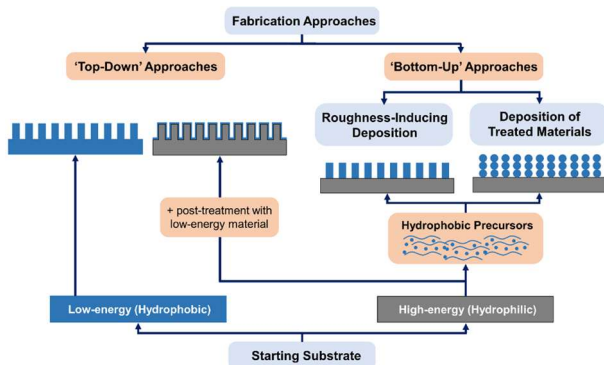


Fig. 2. Schematic illustrating the approaches for fabrication of superhydrophobic surfaces, and how this can be related to the choice of the starting materials

creating functional superhydrophobic surfaces. The changes in surface morphology during laser irradiation and the resulting microstructures of the laser-treated copper surfaces at various scanning speeds ( $v$ ) are illustrated in Fig. 3.

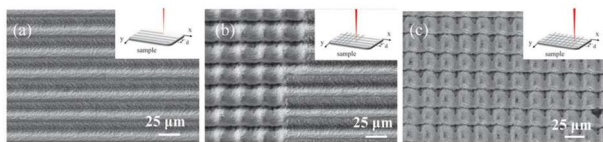


Fig. 3. The changes in surface morphology during laser irradiation process, insets on the top right show the schematics of the laser scanned paths

**Etching.** Etching [13] is a simple and effective approach to increase surface roughness—an essential factor in achieving superhydrophobicity. This process involves removing surface material in two primary ways: isotropically, where the removal is uniform in all directions, or anisotropically, where it occurs in specific directions. Various etching techniques exist, each with unique advantages, and they can be used alone or in combination with other fabrication methods to achieve complex, hierarchical textures. After etching, applying a low surface energy material is a common step to attain the desired superhydrophobic properties. Among various techniques, chemical etching stands out due to its simplicity and low cost. Several studies have explored its application for different substrates. These involve the removal of substrate material by exposure to harsh (acidic or basic) solutions.

Qian et al. [14] reported the synthesis of superhydrophobic surfaces on aluminum, copper, and zinc substrates by using dislocation-selective chemical etching. This process involves preferentially dissolving the dislocation sites in polycrystalline metals, creating hierarchical microstructures such as pits, grooves, and nanoparticles. After etching, the surfaces were treated with fluoroalkylsilane to enhance hydrophobicity, resulting in water contact angles exceeding  $150^\circ$  and roll-off angles below  $10^\circ$ . The study demonstrates a simple yet effective method to fabricate superhydrophobic surfaces, with potential applications for other polycrystalline materials.

Kim et al. [15] reported the synthesis of superhydrophobic stainless steel surfaces by hydrogen fluoride (HF) etching and dipping in a hot 0,1% NaCl solution, followed by fluorination treatment. The effect of the HF etching time was studied, and it was found that 20-min etching led to the highest WCA ( $164^\circ$ ) and lowest sliding angle

( $5^\circ$ ). The treatment with 0,1% NaCl solution was found to further enhance the hydrophobicity (WCA  $168^\circ$ , sliding angle  $2^\circ$ ). This was due to the petal-like structures formed on the etched surface, which provided hierarchical texturing. Interestingly, extending the NaCl dipping time had negligible effect, likely due to the low concentration of the solution, which limited further surface interaction after initial etching. The surfaces showed retention of superhydrophobicity after 30 days of placing in water. Several other reports utilized chemical etching while sharing the main two-step procedure. Examples include the etching of stainless-steel substrates with sulfuric acid and ferric chloride, followed by the modification using octadecyltrichlorosilane and decyltrimethoxysilane, respectively.

Li et al. [16] proposed a similar procedure for creating superhydrophobic stainless steel surfaces while maintaining corrosion resistance. Their approach involved a three-step process: (1) etching with hydrofluoric acid (HF) to generate surface roughness through intergranular corrosion and redeposition of metallic oxides and fluorides, (2) passivation in nitric acid to restore corrosion resistance, and (3) deposition of a fluorocarbon film to reduce surface energy. This method was tested on both 304 and 316 grades of stainless steel, with significant differences observed due to their varying alloy compositions. The primary distinction being that 316 SS contains 2-3 wt. % molybdenum while 304 SS does not. Instead of adding secondary materials to create roughness, their approach utilized chemical etching to directly modify the stainless-steel surface, thereby maintaining its mechanical properties. The selective etching targeted grain boundaries through intergranular corrosion, creating micro- and sub-micrometer scale roughness. After passivation to restore corrosion resistance, a plasma-deposited fluoropolymer coating was applied to achieve high water contact angles and low hysteresis. This research addressed limitations of previous superhydrophobic stainless steel fabrication techniques, which often relied on either non-scalable process like femtosecond laser ablation or coating with materials that lacked mechanical durability.

Lee et al. [17] developed a highly efficient and reproducible approach to fabricate large-scale nanostructured polymeric and metallic surfaces with precise ratio control, utilizing anodic aluminum oxides (AAOs) or textured aluminum as replication templates, the scheme as shown in Fig. 4. The process combines photolithography,

aluminum etching, and anodization with polymer replication to produce hierarchical micro- and nanostructures. Initially, photolithography using positive photoresist and square-patterned shadow masks imprints micrometer-scale patterns onto aluminum sheets. The researchers then used an etching solution to selectively transform the patterns into concave structures. Following this, anodization and AAO removal enable the formation of nanostructures, such as nanopores and nanogrooves, on both flat surfaces and within the micrometer-scale concavities. Finally, heat- and pressure-driven imprinting of thermoplastic polymers, particularly high-density polyethylene (HDPE), replicates the hierarchical designs, with HDPE being chosen for its chemical stability and resemblance to natural hydrophobic materials. The fabricated surfaces demonstrate superhydrophobic properties, attributed to the synergistic effects of the hierarchical structures and material composition. Results show a maximum static contact angle of  $113^\circ$  for surfaces with only micrometer-scale patterns (pitch size  $25\ \mu\text{m}$ ) and up to  $139^\circ$  for flat HDPE with nanostructures. The highest contact angle of  $159^\circ$  was achieved on HDPE with hierarchical structures combining nanofibers and micrometer-scale papillae, demonstrating a 67% increase compared to flat surfaces. Replicas remained superhydrophobic over three months of air storage, proving the method's robustness and reliability. This technique provides a scalable and adaptable platform for producing functional and biomimetic superhydrophobic surfaces, opening avenues for applications in packaging, medical devices, and antifouling coatings.

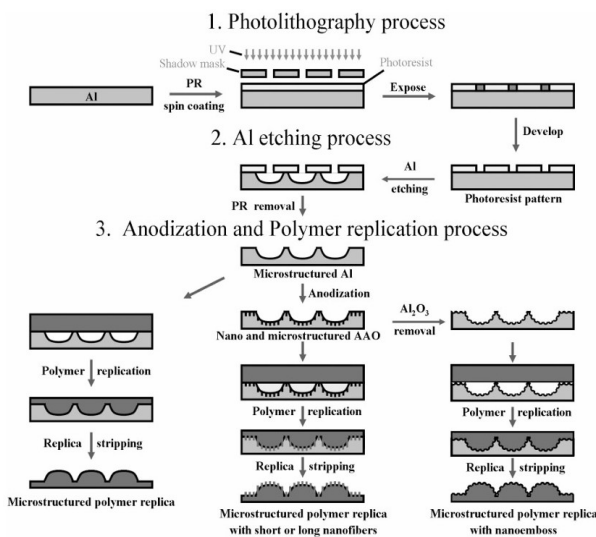


Fig. 4. Scheme of fabrication of HDPE replicas with various shapes of nanometer- and micrometer-structured surfaces [17]

**Lithography.** This is a technique commonly used in microelectronics to create patterns on surfaces. It involves coating a substrate with a light-sensitive material, exposing it to light through a patterned mask, and then developing the exposed areas. This method can be used to create microstructures that contribute to superhydrophobicity. Electron beam lithography is particularly precise and can be used to create complex patterns on a nanoscale [18].

Pozzato et al. [19] developed a cost-effective method for creating superhydrophobic silicon surfaces using nanoimprint lithography combined with wet chemical etching. Their process (Fig. 5) begins with creating a patterned glass mold, which is then imprinted onto a photoresist layer on a silicon substrate. This pattern is subsequently transferred to a  $\text{SiO}_2$  layer and finally to silicon through etching techniques. The researchers employed two distinct etching approaches: 1) Isotropic etching with HNA to produce rounded channels; 2) Anisotropic etching with KOH to create rectangular channels. After etching, the surfaces were coated with octadecyltrichlorosilane (OTS) self-assembled monolayers to enhance hydrophobicity. Contact angle measurements revealed that the advancing contact angles closely aligned with Cassie model predictions, indicating the presence of trapped air beneath water droplets on these surfaces. A key advantage of this fabrication method is its tunability – the surface properties can be readily adjusted by modifying the etching method or mold parameters.

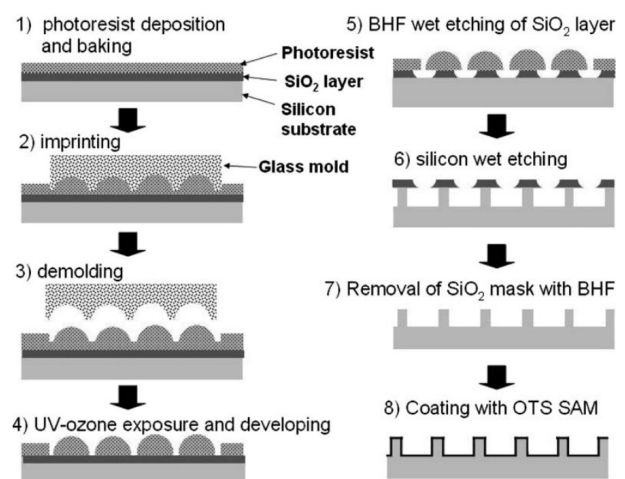


Fig. 5. Schematic of fabrication process [19]

**Template imprinting.** Soft lithography [20] shares the main theory with photolithography in terms of creating a replica of a previously prepared pattern [18]. Template imprinting is a versatile technique that shares the fundamental principle of

photolithography in replicating patterns, unlike photolithography, which uses rigid photomasks, soft lithography employs flexible templates, typically made of polydimethylsiloxane (PDMS), to create micro- and nano-scale patterns. This method is cost-effective, environmentally friendly, and supports diverse applications, including biosensors and nanotechnology. Soft lithography offers advantages in scalability and material compatibility but faces challenges such as template deformation and defect control during the imprinting process.

Liu et al. [21] introduced a soft-lithographic imprinting technique to fabricate superhydrophobic surfaces inspired by lotus leaves. To replicate lotus leaf-inspired microstructures, Liu et al. [21] employed a soft-lithography approach using PDMS molds, which were cast directly from natural templates. These stamps replicate microstructures and are pressed onto substrates coated with an epoxy-based azo polymer (BP-AZ-CA) in tetrahydrofuran ink, under moderate pressure (approximately  $5 \times 10^4 \text{ Nm}^{-2}$ ) for about 10 seconds. After drying the substrate in a  $25^\circ \text{C}$  vacuum oven for 6 hours, the fabricated surfaces display papillary structures, achieving a water contact angle of  $154,6^\circ$  and a low contact angle hysteresis ( $3,3^\circ$ ). This simple, scalable method demonstrates versatility for various substrates and has potential applications in water-repellent and self-cleaning technologies.

Yun et al. [20] presented an innovative soft-lithographic approach for fabricating superhydrophobic lotus-leaf-like surfaces using reduced graphene oxide (RGO), the schematic as shown in Fig. 6. Leveraging the natural hierarchical micro/nanoscale structures of lotus leaves, polydimethylsiloxane (PDMS) stamps were prepared by replicas molding against fresh lotus leaves as the masters. Octadecylamine-modified reduced graphene oxide (ODA-RGO) was synthesized via a chemical reduction of graphene oxide (GO) with hydroquinone and octadecylamine. The resulting ODA-RGO dispersion in tetrahydrofuran (THF) served as the ink for the microcontact printing process. The PDMS stamps, coated with the ODA-RGO ink, were gently pressed onto pre-cleaned substrates such as glass slides and silicon wafers, transferring the intricate surface features of the lotus leaves. Characterization techniques, including FTIR, XPS, Raman spectroscopy, SEM, and confocal microscopy, revealed high-fidelity replication of the lotus leaf's papillary microstructures and additional nanoscale roughness derived from stacked RGO nanosheets. The fabricated surfaces demonstrated remarkable superhydrophobicity, evidenced by water contact

angles exceeding  $160^\circ$ , and exhibited robust environmental durability under extreme conditions, such as exposure to corrosive solutions or elevated temperatures. This research highlights the potential applications of these surfaces in fields requiring durable hydrophobic and anti-corrosion properties.

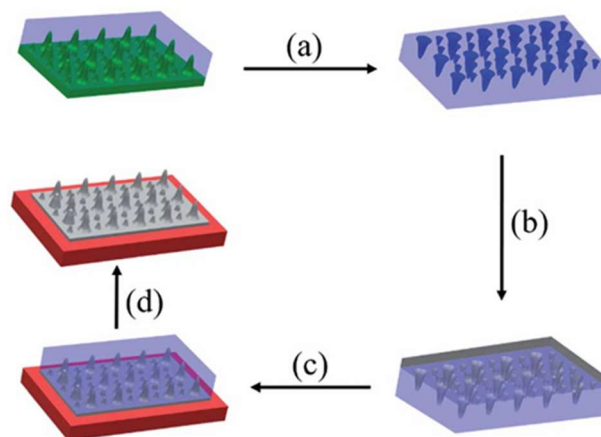


Fig. 6. Schematic diagram of the fabrication process of the ODA-RGO lotus-leaf-like surfaces:

- a – preparation of the PDMS stamp through replica molding against a piece of fresh lotus leaf, b – dropping the ODA-RGO dispersion on the PDMS stamp to form a thin layer of the “ink” on the surface, c – pressing the “inked” stamp against the substrate for a few seconds, d – peeling off the PDMS stamp and vacuum drying

**Bottom-up approaches** refer to fabrication techniques where materials are built from their fundamental building blocks (atoms, molecules, or nanoparticles) that self-organize or are directed to assemble into more complex structures [22].

**3D printing** technology represents an advanced deposition methodology for the fabrication of superhydrophobic surfaces [23]. This additive manufacturing approach shares fundamental principles with Layer-by-Layer (LbL) assembly techniques through its sequential construction of precisely controlled structural elements. However, 3D printing offers distinct advantages in the context of superhydrophobic surface engineering, including unprecedented geometric complexity, customizable hierarchical architectures, and reproducible surface topographies across multiple scales. The versatility of this manufacturing platform enables the precise implementation of biomimetic design principles while maintaining consistent quality parameters throughout the fabrication process.

It was reported [24] for the replication of the *Salvinia* leaf ‘eggbeater’ structure were fabricated by the Immersed surface accumulation three dimensional (3D) printing process. Multi-walled

CNTs were added to the liquid photo-curable resin utilized to increase surface roughness. The number of arms of the eggbeater shape ( $N$ ), as well as their spacing ( $d$ ), was investigated for their effect on the superhydrophobic properties (Figure 13. b-g). It was found that hydrophobicity is maximized when the spacing is kept at  $d=0.5$ . Moreover, applying  $N=2$  resulted in a highly superhydrophobic surface ( $WCA = 170^\circ$ ), although the reduced number of arms made the structures fragile. Applying  $N=4$  was found to be a good compromise between both strength and superhydrophobicity ( $152^\circ$ ).

**Electrospinning.** This is an innovative technique that uses an electrically driven jet of a polymer solution or melt to create polymer fibers with diameters ranging from nanometers to a few microns [25]. Electrospinning has emerged as a powerful technique for creating superhydrophobic coatings and surfaces, offering a versatile and efficient approach to fabricating water-repellent materials. This process involves applying a strong electric field to a polymer solution or melt, resulting in the formation of nano-scale filaments that can be collected to create non-woven webs with hierarchical structures. Recent advancements have focused on optimizing polymer blends, incorporating recycled materials like PET, and developing multi-step processes combining electrospinning with other techniques such as electrospraying and spin coating. These innovations have led to the creation of durable, self-cleaning surfaces with water contact angles exceeding  $150^\circ$ , capable of withstanding various mechanical stresses. Applications range from protective coatings for aerospace and solar panels to anticorrosion and anti-icing treatments. The simplicity, scalability, and eco-friendly potential of electrospinning make it a promising method for industrial-scale production of superhydrophobic materials, addressing needs in energy, infrastructure, and environmental sectors [26].

Álvarez et al. presented a novel superhydrophobic and anticorrosive coating using a three-step process involving electrospinning, spin coating, and electrospraying. They combined polytetrafluoroethylene (PTFE) with poly(acrylic acid) +  $\beta$ -cyclodextrin (PAA +  $\beta$ -CD) to create a composite coating on aluminum alloys. The electrospun PAA +  $\beta$ -CD layer provided adhesion and a porous network for PTFE particles, while the spin-coated PTFE layer ensured uniform distribution. The final electrosprayed layer enhanced particle bonding through heat treatments, achieving water contact angles (WCA) above  $150^\circ$  and excellent corrosion resistance [27].

**Chemical Vapor Deposition (CVD).** This is one of the most sophisticated approaches for fabricating superhydrophobic surfaces, offering exceptional control over surface morphology at the micro and nanoscale. In this gas-phase process, precursor molecules are vaporized and transported to a heated substrate where they react or decompose to form solid deposits with precisely tailored structures. For superhydrophobic applications, CVD excels at creating the dual requirements of hierarchical roughness patterns and low surface energy coatings in a single or multi-step process. The technique allows for the growth of various structures including carbon nanotubes, fluorocarbon polymers, silicon-based compounds, and metal oxides - all of which can be optimized to achieve water contact angles exceeding  $150^\circ$  with minimal hysteresis. What distinguishes CVD from other fabrication methods is its ability to produce highly conformal coatings even on complex geometries, excellent adhesion to substrates, and remarkable durability of the resulting superhydrophobic surfaces, making it particularly valuable for industrial and high-performance applications despite requiring specialized equipment and careful process control [28].

Lau et al. [29] were among the pioneers in fabricating superhydrophobic CNT forests by modifying vertically aligned CNTs (VACNTs) with a polytetrafluoroethylene (PTFE) coating using the chemical vapor deposition (CVD) method. The resultant surface exhibited outstanding water repellency, with advancing and receding contact angles (CAs) of  $170^\circ$  and  $160^\circ$ , respectively. This work demonstrated the effectiveness of surface functionalization in achieving high hydrophobicity by facilitating the Cassie-Baxter wetting regime, where air is trapped between the water droplet and the surface, minimizing liquid-solid contact. In another study, Sun et al. [30] explored the fabrication of three-dimensional CNT films on patterned silicon substrates, examining the effect of nanotube orientation on the surface wettability. The study revealed that the alignment of the CNT arrays had a significant influence on the surface's wetting properties, enabling a wide range of wettability, from hydrophilic ( $CA < 30^\circ$ ) to superhydrophobic ( $CA > 150^\circ$ ), depending on the CNT orientation and spacing. This work highlighted the potential of anisotropic microstructures in controlling surface energy and tuning wettability for a variety of applications. Jiang et al. [31] further refined the fabrication of ACNT films by modulating the microstructural features, such as pillar spacing, to achieve transitionable wettability states. By

adjusting the pillar spacing from 6  $\mu\text{m}$  to 20  $\mu\text{m}$ , they produced films with varying contact angles, from hydrophilic (22,2°) to superhydrophobic (>163°), and demonstrated excellent sliding properties (sliding angles < 5°). The CNTs were grown using CVD on silicon templates and scanning electron microscopy (SEM) and atomic force microscopy (AFM) analyses revealed the nanotubes' hexagonal and honeycomb-like microstructure. This work emphasized the role of three-dimensional anisotropy and air entrapment in enhancing surface hydrophobicity, far exceeding predictions made by the Wenzel and Cassie models.

**Layer by layer deposition.** This technique is a highly adaptable and cost-effective method for fabricating coatings with precisely controlled chemical composition and nanostructure [32]. By sequentially depositing oppositely charged or complementary materials—such as polymers, nanoparticles, or biomolecules—this technique enables the formation of multilayer films with tunable thickness and tailored functionality. Its mild, aqueous processing conditions make it suitable for coating a wide range of substrates, including complex, non-flat, and large-area surfaces, ensuring conformal coverage even on highly irregular geometries. The modular nature of LbL allows for the incorporation of diverse materials, resulting in multifunctional coatings with applications spanning anti-corrosion, biomedical, energy, and environmental fields. Moreover, advancements in scalable deposition methods have expanded its industrial potential, making LbL assembly a powerful platform for designing advanced, sustainable coatings tailored to specific performance requirements [33]. This method involves sequentially depositing alternating layers of materials, such as polymers, nanoparticles, or other hydrophobic agents, to form hierarchical surfaces that enhance water repellency. Sutar et al. [34] the fabrication of robust self-cleaning superhydrophobic coatings by depositing polymer layers on candle soot surfaces. This approach combined the hierarchical structure of soot with a polymer layer to improve durability and self-cleaning properties, making it suitable for oil-water separation and industrial applications.

**Sol-gel methods.** The sol-gel methodology for fabricating superhydrophobic coatings represents a sophisticated chemical approach wherein precursors (typically metal alkoxides) undergo sequential hydrolysis and condensation reactions to transition from a colloidal solution to an interconnected network, while simultaneously incorporating both low surface energy components

(such as fluoroalkylsilanes, long-chain alkyl groups, or silicone derivatives) and hierarchical surface roughness features (achieved through template-assisted processing, nanoparticle incorporation, phase separation, or layer-by-layer deposition), which can be applied via dip coating, spin coating, or spray techniques and subsequently modified through thermal curing, chemical vapor treatment, or plasma processing to enhance durability and functionality; despite challenges including mechanical resilience, long-term stability, scalability, and environmental concerns (addressed through reinforcing nanofillers, UV-resistant additives, industrial process optimization, and fluorine-free alternatives, respectively), this versatile platform continues to evolve with recent innovations in self-healing capabilities, stimuli-responsive wettability, optical transparency, and multifunctionality, thereby maintaining its position as an indispensable approach for creating surfaces with precise control over chemistry and topography at the nanoscale for applications ranging from self-cleaning surfaces to anti-icing, anti-corrosion, and anti-fouling technologies.

Lu et al. [35] explored the superhydrophobic properties of a bulk material prepared using epoxy resin and hydrogenated silicone oil (PMHS) through a sol-gel method. The material was formed by combining various reagents, followed by ultrasonic dissolution, refluxing, drying, and polishing to enhance its surface roughness. Analysis showed that nanoparticles of 50–100 nm played a key role in achieving superhydrophobicity, with polishing increasing the water contact angle from 133° to 152°. Thermal tests demonstrated durability up to 300 °C, with optimal hydrophobic properties achieved at 100 °C, where the contact angle reached 161°. The material also displayed excellent repairability, regaining hydrophobicity after surface damage and polishing. With its durability, recoverability, and hydrophobic performance, this material has promising applications in fields like self-cleaning, corrosion protection, and oil-water separation.

**Covalent functionalization.** This is a critical strategy in the development of durable superhydrophobic coatings, enabling chemical bonding between hydrophobic agents and substrate surfaces. This approach enhances the mechanical, chemical, and thermal stability of coatings while ensuring long-term functionality under harsh conditions.

Zhang et al. [36] prepared carbon nanotubes (CNTs) grafted with silica nanoparticles to create CNTs-SiO<sub>2</sub> hybrids, which were incorporated into

an epoxy matrix using a one-step spraying method. The resulting superhydrophobic coating achieved a water contact angle of  $159,3^\circ$  when the ratio of CNTs to  $\text{SiO}_2$  was 1:3. The entwined CNTs- $\text{SiO}_2$  hybrids created a micro-nano hierarchical structure, enhancing water repellency and providing good mechanical durability and chemical stability. Additionally, the coating demonstrated significant photothermal conversion capabilities, delaying water freezing and efficiently melting ice under laser irradiation

**Physical treatment.** Physical treatments for superhydrophobic coatings involve methods to enhance surface roughness, durability, and functionality [37]. Abrasion followed by heating can restore hydrophobicity through self-healing mechanisms, with coatings regaining high contact angles and low sliding angles after degradation cycles. Micropatterning via physical friction, combined with annealing and chemical modifications, creates multifunctional superhydrophobic surfaces with enhanced anti-corrosion and anti-adhesive properties [26]. Liquid Flame Spraying (LFS) efficiently produces nanostructured coatings on large surfaces using eco-friendly processes. Electrochemical anodization generates nanotube structures that improve hydrophobicity when combined with surface chemical modifications. Additionally, integrating physical structuring with chemical repair techniques enables the development of self-repairing surfaces resistant to environmental damage [38]. These treatments are essential for applications such as medical devices, corrosion protection, and self-cleaning technologies.

**Combination of bottom-up and top-down approaches.** The integration of bottom-up and top-down approaches in the fabrication of superhydrophobic coatings provides an effective strategy to address the inherent limitations of each method when applied independently, enhancing the overall performance and applicability of the resulting surfaces. Bottom-up techniques, such as sol-gel processing and layer-by-layer assembly, enable precise control over chemical composition and nanoscale structuring, forming a foundation of finely tuned surface properties. In contrast, top-down methods, including laser texturing and plasma etching, introduce controlled micro- and macro-scale roughness, essential for achieving the hierarchical surface topography critical to superhydrophobicity. By combining these approaches, such as applying sol-gel coatings onto pre-textured substrates or employing physical structuring as a post-treatment to chemically

assembled layers, researchers can engineer surfaces with multi-scale roughness, significantly improving water repellency, durability, and functional efficiency. This hybrid methodology also allows for tailored material compatibility and optimized process parameters, though it requires careful consideration of sequencing, substrate selection, and scalability to ensure practical implementation [39].

#### **Fabrication and Scalability Challenges.**

Despite significant progress in the development of superhydrophobic coatings, their widespread application is limited by technological, operational and environmental factors. Although high-precision top-down methods such as laser ablation are reliable, they are expensive and have a low throughput. Bottom-up approaches (e.g. sol-gel) are more scalable but often have inferior structural integrity [40]. Material incompatibility remains a significant barrier, as the need for specialized substrate preparation and the use of adhesives that increase surface energy can reduce hydrophobicity [41].

Financial barriers include the high cost of initial components and inefficient processes such as photolithography. Under real-world conditions, coatings lose effectiveness when in contact with oils or surfactant-containing solutions, and when condensation occurs below the dew point, destroying the air gap. The lack of uniform testing standards for wear, penetration and weatherability makes it difficult to compare data [42].

Environmental risks are associated with the use of fluorine-containing compounds that are toxic and have low biodegradability [43], as well as with waste generation when coatings are applied using non-uniform methods. Over 50% of commercial products are designed for materials with natural roughness, such as fabric, wood and paper, while coatings for metals and glass remain rare. Additionally, the temperature instability of most coatings limits their versatility [44].

**Conclusion.** Addressing the durability challenges of superhydrophobic surfaces requires a multifaceted approach that integrates several innovative strategies. Self-healing capabilities utilizing responsive polymers and microcapsule-based healing agents offer promising solutions to maintain surface integrity despite mechanical damage. Biomimetic engineering principles, particularly those derived from resilient natural models such as *Salvinia molesta*, provide valuable design insights for creating more robust water-repellent structures. The establishment of a cross-sector collaborative framework with standardized

testing protocols has proven essential for bridging the gap between laboratory innovations and commercial applications. Ultimately, the widespread adoption of superhydrophobic technologies hinges on achieving an optimal balance between performance metrics, production economics, and environmental sustainability. A challenge that requires continued interdisciplinary cooperation among materials scientists, engineers, and industry stakeholders to overcome current limitations and unlock the full potential of these remarkable surfaces. Superhydrophobic surfaces represent a transformative technology with applications spanning multiple industries. Ongoing research continues to advance, and the integration of superhydrophobic surfaces with other technologies promises to unlock even greater possibilities, driving progress in fields from healthcare to energy. Future developments may include surfaces that adjust their properties in response to environmental changes, such as temperature or pH. This adaptability could open new possibilities in fields like medicine and advanced manufacturing. Combining superhydrophobic surfaces with sensors or energy harvesting devices could create multifunctional materials. For instance, a surface that repels water while also generating electricity from environmental vibrations offers exciting possibilities for smart technologies.

### References

- Barthlott W., Neinhuis C. Purity of the sacred lotus, or escape from contamination in biological surfaces. *Planta*. 1997. Vol. 202, no. 1. P. 1–8. URL: <https://doi.org/10.1007/s004250050096>
- Ma M., Hill R. M. Superhydrophobic surfaces. *Current opinion in colloid & interface science*. 2006. Vol. 11, no. 4. P. 193–202. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cocis.2006.06.002>
- Xiang S., Liu W. Self-Healing superhydrophobic surfaces: healing principles and applications. *Advanced materials interfaces*. 2021. P. 2100247. URL: <https://doi.org/10.1002/admi.202100247>
- Cassie A. B. D. Contact angles. *Discussions of the faraday society*. 1948. Vol. 3. P. 11. URL: <https://doi.org/10.1039/d9480300011>
- Superhydrophobicity in perfection: the outstanding properties of the lotus leaf / H. J. Ensikat et al. *Beilstein journal of nanotechnology*. 2011. Vol. 2. P. 152–161. URL: <https://doi.org/10.3762/bjnano.2.19>
- The challenges, achievements and applications of submersible superhydrophobic materials / Y. A. Mehanna et al. *Chemical society reviews*. 2021. Vol. 50, no. 11. P. 6569–6612. URL: <https://doi.org/10.1039/d0cs01056a>
- Crick C., Parkin I. Preparation and characterisation of super-hydrophobic surfaces. *Chemistry - A european journal*. 2010. Vol. 16, no. 12. P. 3568–3588. URL: <https://doi.org/10.1002/chem.200903335>
- Superhydrophobic surfaces: a review on fundamentals, applications, and challenges / J. Jeevahan et al. *Journal of coatings technology and research*. 2018. Vol. 15, no. 2. P. 231–250. URL: <https://doi.org/10.1007/s11998-017-0011-x>
- Guo Y., Zhao H. Femtosecond laser processed superhydrophobic surface. *Journal of manufacturing processes*. 2024. Vol. 109. P. 250–287. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2023.12.005>
- Ultrafast laser processing of materials: a review / K. C. Phillips et al. *Advances in optics and photonics*. 2015. Vol. 7, no. 4. P. 684. URL: <https://doi.org/10.1364/aop.7.000684>
- Laser textured superhydrophobic surfaces and their applications for homogeneous spot deposition / V. D. Ta et al. *Applied surface science*. 2016. Vol. 365. P. 153–159. URL: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2016.01.019>
- Superhydrophobic surfaces fabricated by femtosecond laser with tunable water adhesion: from lotus leaf to rose petal / J. Long et al. *ACS applied materials & interfaces*. 2015. Vol. 7, no. 18. P. 9858–9865. URL: <https://doi.org/10.1021/acsami.5b01870>
- Bayer I. S. Superhydrophobic coatings from ecofriendly materials and processes: a review. *Advanced materials interfaces*. 2020. Vol. 7, no. 13. P. 2000095. URL: <https://doi.org/10.1002/admi.202000095>
- Qian B., Shen Z. Fabrication of superhydrophobic surfaces by dislocation-selective chemical etching on aluminum, copper, and zinc substrates. *Langmuir*. 2005. Vol. 21, no. 20. P. 9007–9009. URL: <https://doi.org/10.1021/la051308c>
- Facile fabrication of superhydrophobic surfaces from austenitic stainless steel (AISI 304) by chemical etching / J.-H. Kim et al. *Applied surface science*. 2018. Vol. 439. P. 598–604. URL: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.12.211>
- Li L., Breedveld V., Hess D. W. Creation of superhydrophobic stainless steel surfaces by acid treatments and hydrophobic film deposition. *ACS applied materials & interfaces*. 2012. Vol. 4, no. 9. P. 4549–4556. URL: <https://doi.org/10.1021/am301666c>
- Fabrication of hierarchical structures on a polymer surface to mimic natural superhydrophobic surfaces / Y. Lee et al. *Advanced materials*. 2007. Vol. 19, no. 17. P. 2330–2335. URL: <https://doi.org/10.1002/adma.200700820>
- Manoharan K., Bhattacharya S. Superhydrophobic surfaces review: functional application, fabrication techniques and limitations. *Journal of*

- micromanufacturing. 2019. Vol. 2, no. 1. P. 59–78. URL: <https://doi.org/10.1177/2516598419836345>
19. Superhydrophobic surfaces fabricated by nanoimprint lithography / A. Pozzato et al. *Microelectronic engineering*. 2006. Vol. 83, no. 4-9. P. 884–888. URL: <https://doi.org/10.1016/j.mee.2006.01.012>
  20. Superhydrophobic lotus-leaf-like surface made from reduced graphene oxide through soft-lithographic duplication / X. Yun et al. *RSC advances*. 2020. Vol. 10, no. 9. P. 5478–5486. URL: <https://doi.org/10.1039/c9ra10373b>
  21. Fabricating Super-Hydrophobic Lotus-Leaf-Like Surfaces through Soft-Lithographic Imprinting / B. Liu et al. *Macromolecular rapid communications*. 2006. Vol. 27, no. 21. P. 1859–1864. URL: <https://doi.org/10.1002/marc.200600492>
  22. Superhydrophobic perpendicular nanopin film by the bottom-up process / E. Hosono et al. *Journal of the american chemical society*. 2005. Vol. 127, no. 39. P. 13458–13459. URL: <https://doi.org/10.1021/ja053745j>
  23. Application of 3D printing for fabrication of superhydrophobic surfaces with reversible wettability / W. Zhao et al. *RSC advances*. 2024. Vol. 14, no. 25. P. 17684–17695. URL: <https://doi.org/10.1039/d4ra02742f>
  24. 3D-Printed biomimetic super-hydrophobic structure for microdroplet manipulation and oil/water separation / Y. Yang et al. *Advanced materials*. 2017. Vol. 30, no. 9. P. 1704912. URL: <https://doi.org/10.1002/adma.201704912>
  25. Doshi J., Reneker D. H. Electrospinning process and applications of electrospun fibers. *Journal of electrostatics*. 1995. Vol. 35, no. 2-3. P. 151–160. URL: [https://doi.org/10.1016/0304-3886\(95\)00041-8](https://doi.org/10.1016/0304-3886(95)00041-8)
  26. Superhydrophobic electrospun nanofibers / N. Nuraje et al. *J. Mater. Chem. A*. 2013. Vol. 1, no. 6. P. 1929–1946. URL: <https://doi.org/10.1039/c2ta00189f>
  27. Novel design of superhydrophobic and anticorrosive PTFE and PAA +  $\beta$  - CD composite coating deposited by electrospinning, spin coating and electrospaying techniques / A. Vicente et al. *Polymers*. 2022. T. 14, № 20. C. 4356. URL: <https://doi.org/10.3390/polym14204356>
  28. Superhydrophobic fabrics produced by electrospinning and chemical vapor deposition / M. Ma et al. *Macromolecules*. 2005. Vol. 38, no. 23. P. 9742–9748. URL: <https://doi.org/10.1021/ma0511189>
  29. Superhydrophobic carbon nanotube forests / K. K. S. Lau et al. *Nano letters*. 2003. Vol. 3, no. 12. P. 1701–1705. URL: <https://doi.org/10.1021/nl034704t>
  30. 3D carbon nanotube network based on a hierarchical structure grown on carbon paper backing / X. Sun et al. *Chemical physics letters*. 2004. Vol. 394, no. 4-6. P. 266–270. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cplett.2004.07.014>
  31. Superaligned carbon nanotube arrays, films, and yarns: a road to applications / K. Jiang et al. *Advanced materials*. 2011. Vol. 23, no. 9. P. 1154–1161. URL: <https://doi.org/10.1002/adma.201003989>
  32. Boinovich L., Emelyanenko A. Principles of design of superhydrophobic coatings by deposition from dispersions. *Langmuir*. 2009. Vol. 25, no. 5. P. 2907–2912. URL: <https://doi.org/10.1021/la803806w>
  33. Li Y., Liu F., Sun J. A facile layer-by-layer deposition process for the fabrication of highly transparent superhydrophobic coatings. *Chemical communications*. 2009. No. 19. P. 2730. URL: <https://doi.org/10.1039/b900804g>
  34. Fabrication of robust self-cleaning superhydrophobic coating by deposition of polymer layer on candle soot surface / R. S. Sutar et al. *Journal of applied polymer science*. 2020. Vol. 138, no. 9. P. 49943. URL: <https://doi.org/10.1002/app.49943>
  35. Study on the superhydrophobic properties of an epoxy resin-hydrogenated silicone oil bulk material prepared by sol-gel methods / K. Zheng et al. *Materials*. 2021. Vol. 14, no. 4. P. 988. URL: <https://doi.org/10.3390/ma14040988>
  36. A durable and photothermal superhydrophobic coating with entwined CNTs-SiO<sub>2</sub> hybrids for anti-icing applications / F. Zhang et al. *Chemical engineering journal*. 2021. Vol. 423. P. 130238. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.130238>
  37. Parvate S., Dixit P., Chattopadhyay S. Superhydrophobic surfaces: insights from theory and experiment. *The journal of physical chemistry B*. 2020. Vol. 124, no. 8. P. 1323–1360. URL: <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.9b08567>
  38. Barthwal S., Uniyal S., Barthwal S. Nature-Inspired superhydrophobic coating materials: drawing inspiration from nature for enhanced functionality. *Micromachines*. 2024. Vol. 15, no. 3. P. 391. URL: <https://doi.org/10.3390/mi15030391>
  39. Modifying flexible polymer films towards superhydrophobicity and superoleophobicity by utilizing water-based nanohybrid coatings / F. Krasanakis et al. *Nanoscale*. 2023. URL: <https://doi.org/10.1039/d2nr06780c>
  40. Challenges and strategies for commercialization and widespread practical applications of superhydrophobic surfaces / L. Li et al. *Science advances*. 2023. Vol. 9, no. 42. URL: <https://doi.org/10.1126/sciadv.adj1554>
  41. Modification of commercial polymer coatings for superhydrophobic applications / S. S. Cassidy et al. *ACS omega*. 2024. URL: <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c09123>
  42. Bioinspired surfaces for turbulent drag reduction / K. B. Golovin et al. *Philosophical transactions of the royal society A: mathematical, physical and*

- engineering sciences. 2016. Vol. 374, no. 2073. P. 20160189. URL: <https://doi.org/10.1098/rsta.2016.0189>
43. Environment-Friendly antibiofouling superhydrophobic coatings / S. M. R. Razavi et al. ACS sustainable chemistry & engineering. 2019. Vol. 7, no. 17. P. 14509–14520. URL: <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.9b02025>
44. Recent progresses of superhydrophobic coatings in different application fields: an overview / Y. Bai et al. Coatings. 2021. Vol. 11, no. 2. P. 116. URL: <https://doi.org/10.3390/coatings11020116>

#### **Юн Ц., Баклан Д.В. Огляд технологій виготовлення супергідрофобних покриттів**

Супергідрофобні поверхні стали ключовим напрямком сучасного матеріалознавства. Ці поверхні вирізняються унікальною поведінкою при змочуванні та широким спектром потенційних застосувань у таких сферах, як самоочисні покриття, антикорозійний захист, зменшення лобового опору, технології боротьби з обмерзанням та розділення нафти і води. Натхненні природними моделями, такими як листя лотоса, водорізи та *Salvinia molesta*, ці поверхні поєднують матеріали з низькою поверхневою енергією з ієрархічною мікро/наноструктурою для досягнення кутів контакту з водою, що перевищують 150°. Ця двошарова шорсткість утримує повітряні кишені під краплями води, забезпечуючи «ефект лотоса», коли краплі скочуються з поверхні, видаляючи забруднення. Розробка супергідрофобних покриттів особливо важлива в контексті корозії металів, оскільки економічні та екологічні фактори створили попит на безпечніші та стійкіші альтернативи. Було розроблено широкий спектр технологій виготовлення, включаючи низхідні методи, такі як лазерна абляція і травлення, і висхідні стратегії, такі як золь-гель осадження і хімічне осадження з газової фази. Однак багато підходів обмежені складністю, вартістю, масштабованістю або впливом на навколишнє середовище. Крім того, практичне застосування цих покриттів пов'язане з проблемами довговічності, сумісності матеріалів, продуктивності під впливом екологічних стресів та використання фторованих сполук, які становлять екологічні ризики. У цьому огляді критично проаналізовано сучасні методології виготовлення

супергідрофобних поверхонь. Оцінюються основні принципи, переваги та обмеження цих методів з точки зору механічної міцності, масштабованості та вимог до конкретних застосувань. Особливий акцент зроблено на важливості багатомасштабного структурування поверхні та вибору гідрофобних, низькоенергетичних матеріалів для створення функціонально стійких покриттів. Крім того, в роботі досліджуються обмеження поточних стандартів тестування і припускається, що уніфікована система оцінки механічного зносу, стійкості до навколишнього середовища і гідрофобного утримання має важливе значення для прискорення передачі технології від лабораторії до промислового масштабу. Огляд висвітлює нові стратегії, такі як біоміметичний дизайн, використання матеріалів, що самовідновлюються, та інтеграція супергідрофобних покриттів з багатфункціональними технологіями як перспективні майбутні напрямки. Зрештою, успіх технологій супергідрофобних поверхонь залежить від міждисциплінарних зусиль, що збалансують показники продуктивності з екологічною відповідальністю та економічною доцільністю для розкриття їхнього трансформаційного потенціалу в різних секторах.

**Ключові слова:** супергідрофобні покриття, кут змочування, змочуваність поверхні, шорсткість поверхні, водовідштовхувальні властивості, методи виготовлення.

**Юн Цзо** – аспірант, Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", хіміко-технологічний факультет, кафедра хімічної технології композиційних матеріалів, [zuo.yong@lil.kpi.ua](mailto:zuo.yong@lil.kpi.ua).

**Баклан Денис Віталійович** – доктор філософії, асистент, Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", хіміко-технологічний факультет, кафедра хімічної технології композиційних матеріалів, [d.baklan@kpi.ua](mailto:d.baklan@kpi.ua).

Стаття подана 12.05.2025.

Наукове видання

**ВІСНИК  
СХІДНОУКРАЇНСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО  
УНІВЕРСИТЕТУ  
імені ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ  
№ 5 (291) 2025**

**Науковий журнал**

Відповідальний за випуск

Лорія М.Г.

Оригінал-макет

Могильна О.В.

**Статті надруковано в авторській редакції**

Підписано до друку 10.07.2025 р.  
Формат 60 x 84 1/8. Папір офсетний. Гарнітура Times.  
Друк офсетний. Умов. друк. арк. 14,2. Обл.-вид. арк. 15,9.  
Наклад 50 прим. Вид. № 3419. Запов. № \_\_. Ціна вільна.

Видавництво  
Східноукраїнського національного університету  
імені Володимира Даля

Свідоцтво про реєстрацію: серія ДК № 1620 від 18.12.03 р.

**Адреса університета:** вул. Іоанна Павла II, 17,  
м. Київ, 01042, Україна

**E-mail:** [vidavnictvoSNU.ua@gmail.com](mailto:vidavnictvoSNU.ua@gmail.com)

Надруковано: