

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СХІДНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
імені ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ



В І С Н И К

**Східноукраїнського
національного університету
імені ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ**

**№ 4 (290)
2025**

НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ

ВІСНИК

СХІДНОУКРАЇНСЬКОГО
НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
ІМЕНІ ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ

№ 4 (290) 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

№ 4 (290) 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 № 9 від 25 квітня 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

- Vychuzhanin V.V., Vychuzhanin A.V.**
ADAPTIVE CASE-BASED REASONING WITH PROBABILISTIC INTEGRATION FOR
THE DIAGNOSIS AND PROGNOSIS OF THE TECHNICAL CONDITION OF COMPLEX SYSTEMS..... 5
- Римар П.В., Ліваковський В.К.**
РОЗРОБКА ПЛАТФОРМИ ДЛЯ УПРАВЛІННЯ ХАРЧУВАННЯМ З ІНТЕГРАЦІЄЮ ШТУЧНОГО
ІНТЕЛЕКТУ 21

Спеціальність 133

- Данилюк Н.Я.**
СТРАТЕГІЧНІ ПІДХОДИ ДО ЗМЕНШЕННЯ РИЗИКІВ РУЙНУВАННЯ БУРИЛЬНИХ КОЛОН
НА ОСНОВІ СИСТЕМ ІНЖЕНЕРНОГО МОНІТОРИНГУ 27
- Шостаківський І.І., Мосора Ю.Р., Лях М.М., Врюкало В.В., Михайлюк В.В., Борущак Л.О.**
ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ЕЛЕМЕНТІВ УНІВЕРСАЛЬНОГО
ПРЕВЕНТОРА 41

Спеціальність 161

- Пушкаръов Д.В., Слепцов О.О., Сова Н.В., Савченко Б.М.**
АДИТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ СТВОРЕННЯ ТЕПЛОПРОВІДНИХ ПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИТІВ 48
- Лісачук Г.В., Баглай В.Ю.**
ДО ПИТАННЯ ПРО СТВОРЕННЯ КОМПОЗИЦІЙНИХ КЕРАМІЧНИХ МАТЕРІАЛІВ 57
- Khlystun S.O., Myronyuk O.V.**
CURRENT STATE OF THE ART IN POLYLACTIDE POLYMER
WATER EMULSIONS DEVELOPMENT 63

Спеціальність 151

- Duryshv O. A., Kobzarev E. V., Gurin O.M., Loriia M.G**
STUDY OF THE IMPACT OF DISCRETE CONTROL OF THE COOLING
AND CONDENSATION UNIT ON THE EFFICIENCY OF AMMONIA PRODUCTION..... 72

Спеціальність 133

- Мелконов Г.Л., Фесенко Г.В., Курлов В.І.**
ПІДВИЩЕННЯ РІВНЯ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ
МОЖЛИВОСТЕЙ ПОСІВНОЇ МАШИНИ З ДИСКОВИМИ СОШНИКАМИ 78

Спеціальність 273

- Fomin O.V., Burlutskyi O.V., Khara M.V., Rybachenko Y.M.**
CAUSE AND EFFECT RELATIONSHIPS OF FAILURES IN THE FUNCTIONING OF STRUCTURAL
COMPONENTS OF RAILWAY ROLLING STOCK 83

Спеціальність 051

- Мельничук І.В., Возний В.З.**
ЕКОНОМІЧНІ АСПЕКТИ ВИКОРИСТАННЯ ВТОРИННИХ РЕСУРСІВ ТА МАТЕРІАЛІВ
У КОНТЕКСТІ ЦИРКУЛЯРНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ..... 90

CONTENTS
Speciality 122

- Vychuzhanin V.V., Vychuzhanin A.V.**
ADAPTIVE CASE-BASED REASONING WITH PROBABILISTIC INTEGRATION FOR
THE DIAGNOSIS AND PROGNOSIS OF THE TECHNICAL CONDITION OF COMPLEX SYSTEMS..... 5
- Rymar P.V., Livakovskiy V.K.**
DEVELOPMENT OF A NUTRITION MANAGEMENT PLATFORM WITH ARTIFICIAL INTELLIGENCE
INTEGRATION 21

Speciality 133

- Danyiuk N.Y.**
STRATEGIC APPROACHES TO REDUCE THE RISKS OF DRILL STRIKE FAILURE BASED ON
ENGINEERING MONITORING SYSTEMS..... 27
- Shostakivskiy I.I., Mosora Y.R., Liakh M.M., Vriukalo V.V., Mykhailiuk V.V., Borushchak L.O.**
STUDY OF THE STRESS-STRAIN STATE OF THE ELEMENTS OF THE ANNULAR PREVENTOR 41

Speciality 161

- Pushkarov D.V., Slietsov A.O., Sova N.V., Savchenko B.M.**
ADDITIVE TECHNOLOGIES FOR CREATING THERMAL CONDUCTIVE POLYMER COMPOSITES 48
- Lisachuk G.V., Baglay V.Yu.**
ON THE ISSUE OF CREATING COMPOSITE CERAMIC MATERIALS 57
- Khlystun S.O., Myronyuk O.V.**
CURRENT STATE OF THE ART IN POLYLACTIDE POLYMER
WATER EMULSIONS DEVELOPMENT 63

Speciality 151

- Duryshv O. A., Kobzarev E. V., Gurin O.M., Loria M.G**
STUDY OF THE IMPACT OF DISCRETE CONTROL OF THE COOLING
AND CONDENSATION UNIT ON THE EFFICIENCY OF AMMONIA PRODUCTION..... 72

Speciality 133

- Melkonov H.L., Fesenko H.V., Kurlov V.I.**
IMPROVING THE FUNCTIONAL CAPABILITIES
OF THE SEEDER WITH DISC COULDERS 78

Speciality 273

- Fomin O.V., Burlutskiy O.V., Khara M.V., Rybachenko Y.M.**
CAUSE AND EFFECT RELATIONSHIPS OF FAILURES IN THE FUNCTIONING OF STRUCTURAL
COMPONENTS OF RAILWAY ROLLING STOCK 83

Speciality 051

- Melnychuk I. V., Voznyi V.Z.**
ECONOMIC ASPECTS OF THE USE OF SECONDARY RESOURCES
AND MATERIALS IN THE CONTEXT OF CIRCULAR ENERGY 90

ТЕХНІЧНІ НАУКИ

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-290-4-5-20>

UDC 004.03

ADAPTIVE CASE-BASED REASONING WITH PROBABILISTIC INTEGRATION FOR THE DIAGNOSIS AND PROGNOSIS OF THE TECHNICAL CONDITION OF COMPLEX SYSTEMS

Vychuzhanin V.V., Vychuzhanin A.V.

АДАПТИВНЕ ПРЕЦЕДЕНТНЕ МІРКУВАННЯ З ІМОВІРНІСЬКОЮ ІНТЕГРАЦІЄЮ ДЛЯ ДІАГНОСТИКИ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ СКЛАДНИХ СИСТЕМ

Вичужанін В.В., Вичужанін О.В.

This study introduces an advanced adaptive Case-Based Reasoning (CBR) framework designed for real-time diagnosis and prognosis of the technical condition of ship power plants, achieved through the seamless integration of Bayesian networks, Markov process modeling, and cognitive simulation within a dynamically adaptive environment. Traditional CBR approaches, while effective at retrieving analogues from historical case archives, often lack the capability to capture complex stochastic dependencies among system components, dynamic degradation patterns under varying operational loads, and real-time contextual variations in sensor data. To address these limitations, the proposed methodology incorporates six integrated phases: data acquisition and normalization, ensuring consistent standardization of heterogeneous sensor readings and operational parameters; probabilistic failure analysis utilizing Bayesian networks to compute conditional failure probabilities and adjust case relevance weights in light of intercomponent dependencies; scenario-driven forecasting based on discrete-time Markov process models to simulate state transition dynamics and predict degradation trajectories; decision adaptation and fusion, which combines classical CBR retrieval outcomes, probabilistic inference results, and forecasted degradation estimates via dynamically normalized weighted coefficients (α , β , γ) that reflect current risk levels; knowledge base maintenance through the incorporation of newly acquired real cases and synthetically generated cases from cognitive simulation, thus enhancing retrieval accuracy and mitigating data scarcity; and automated generation of preventive maintenance recommendations aligned with predicted remaining useful life. Validation experiments conducted

on a comprehensive dataset of more than 11 000 historical and synthetic cases demonstrated a diagnostic accuracy of 91% compared to 79% achieved by traditional CBR, a 6.7% reduction in false alarms, a 5–7% improvement in remaining useful life prediction accuracy, and a 4.7% decrease in forecast error attributable to the cognitive simulation module, which also improved rare-failure detection rates by 5.1%. These empirical results confirm the proposed system's high reliability and robustness under fluctuating operational loads and cascading failure scenarios, as well as its seamless integration into onboard monitoring architectures for optimized maintenance scheduling, reduced unplanned downtime, and enhanced operational safety of maritime power plants.

Keywords: probabilistic analysis, Bayesian networks, Markov processes, cognitive models, dynamic adaptation, technical diagnostics, expert systems

Introduction. Modern technical condition monitoring systems for complex systems, particularly SPPs, face a number of challenges due to increasing equipment complexity, the rapid growth of operational data volumes, and the need for failure prognosis over time [1]. Traditional CBR methods, which focus primarily on retrieving similar historical cases, are limited in their ability to account for the stochastic nature of failure development and the dynamic evolution of the TC of CTSs. This limitation results in reduced diagnostic accuracy under uncertainty and variable

operational loads. Under variable loads and complex cascading interactions between subsystems, this leads to lower diagnostic and prognostic reliability and increases the risk of incorrect decisions.

To enhance diagnostic performance, a methodology for adapting CBR-based decisions has been developed that integrates three key components. Bayesian networks model probabilistic dependencies between component failures and account for cascading effects in fault development. Markov processes forecast changes in equipment condition over time by describing probabilistic transitions between operational and failed states. Simulation modeling dynamically updates weighting coefficients in the CBR model based on real operational data and synthesizes new cases for underrepresented failure scenarios. The joint use of these approaches enables more accurate estimation of failure probabilities for critical SPP components under current operating conditions, correction of CBR-based decisions based on predicted changes in technical condition, automatic adaptation of the case base and real-time reallocation of parameter importance, and generation of substantiated preventive maintenance recommendations to extend equipment life.

The need to develop adaptive CBR mechanisms is confirmed by a review of recent studies in the field. For instance, Nikpour and Aamodt [2] proposed the integration of Bayesian networks into CBR for diagnosing failures under uncertainty, improving decision accuracy. However, their approach relies on static network structures and lacks dynamic adaptation to changing operational parameters. Similar limitations are noted in the work of [3], who applied the Shapley Attitude Integral to account for attribute interactions and expert preferences in case retrieval, significantly improving search quality. However, their method does not address the adaptation of decisions based on probabilistic prognosis of system state. Schultheis [4] presents a hybrid TCBR approach combining CBR with transformers to adapt time series in predictive maintenance tasks, offering enhanced explainability. Nevertheless, the proposed model depends on the presence of similar time series in the database and lacks quantitative uncertainty estimation of forecasts. In their review of explainable CBR, Schoenborn et al. [5] outlined key goals for decision explanation but noted insufficient integration of explainability with probabilistic methods for equipment longevity prediction. Kumar et al. [6] considered inter-case dependencies in process-oriented CBR, improving retrieval accuracy, but did not address the temporal

evolution of cases or failure forecasting. Expanding similarity measures, Malburg et al. [7] proposed attribute weight correction when sensor data is missing, enhancing retrieval robustness, but their method does not implement dynamic adaptation of decisions. Additionally, Gould et al. [8] proposed an AA-CBR-P argumentation mechanism incorporating user preferences in case comparison. However, this method does not account for dynamic changes in equipment condition or probabilistic failure forecasting. In their review on Real-Time Fault Diagnosis methods, Yan et al. [9] emphasized the importance of applying CBR for online diagnostics in industrial systems, while also highlighting the insufficient development of case adaptation mechanisms based on failure prognosis. Thus, existing research addresses isolated aspects of improving CBR quality, but in most cases does not provide a comprehensive solution for dynamic decision adaptation based on probabilistic forecasting of equipment technical condition. This underscores the relevance of the present study.

The aim of this paper is to develop and experimentally validate an adaptive CBR mechanism for diagnosing ship power plants. The proposed approach integrates probabilistic failure analysis using Bayesian networks, time-based forecasting of component technical condition via Markov processes, and dynamic updating of parameter weighting through simulation modeling. The implementation of the proposed approach will improve diagnostic accuracy, take into account the dynamic evolution of equipment condition, and provide effective preventive maintenance recommendations for extending the service life of ship power plants.

Results. Traditional CBR systems are based on retrieving similar failures from a case base and applying solutions derived from past operational experience [1, 10]. However, this approach has a number of significant limitations: neglect of component condition dynamics (classical systems do not account for the gradual degradation of equipment under operational stress); lack of consideration for external operational factors affecting the probability of failure progression; insufficient modeling of cascading failure effects, where interrelated component failures lead to systemic disruptions that are not reflected in diagnostic decision-making.

Integrating CBR with probabilistic methods and simulation modeling helps to overcome these limitations through: refinement of component condition assessments based on modeling probabilistic dependencies between them (using Bayesian networks); forecasting of failure

progression over time using Markov process models; and dynamic updating of the case base through simulation of new scenarios and incorporation of actual operational data.

Some key interdependencies between failures of SPP components and their impact on system functionality are presented in Table 1.

Table 1

Interdependencies of SPP Component Failures and Their Impact on the System

Equipment	Dependent Elements	System Impact
Generator	Electrical network	Power reduction
Pump	Cooling system	Overheating
Engine	Power transmission	Loss of thrust

From the table, it follows that the failure of individual equipment may initiate cascading processes that critically affect the overall operability of the SPP. For example, a generator power drop disrupts power supply to consumers, while pump failure leads to overheating of key systems. To formalize the adaptive CBR decision correction mechanism based on probabilistic analysis, we introduce the basic dependencies.

Let: p_i – the predicted probability of failure for equipment i based on a Bayesian network; s_i – the initial similarity measure of the current case with the i -th precedent; w_i – the adaptive weight of the precedent.

The adaptive weight of the precedent is defined by the formula:

$$\omega_i = s_i \cdot (1 - p_i), \quad (1)$$

where the correction factor $(1-p_i)$ reduces the precedent's weight with an increased failure risk, thereby improving diagnostic robustness under degrading conditions.

The forecast of equipment technical condition over time is carried out using an exponential degradation model of operability probability:

$$P_{working}(t) = P_{working}(0) \cdot e^{-\lambda t}, \quad (2)$$

where: λ – the failure rate of the component (a parameter dependent on operational conditions and equipment characteristics).

The final diagnostic decision D_{final} is formed based on the aggregation of classical CBR decision, probabilistic analysis, and condition forecasting:

$$D_{final} = \alpha \cdot D_{CBR} + \beta \cdot D_{Bayes} + \gamma \cdot D_{Sim}, \quad (3)$$

where $\alpha, \beta, \gamma \geq 0$ are normalized weight coefficients satisfying the condition $\alpha + \beta + \gamma = 1$.

Thus, CBR decision adaptation includes adjustment of initial conclusions based on probabilistic equipment states, prediction of technical condition changes, and case base updates considering new operational data from complex technical systems. This approach significantly increases the accuracy of diagnostics and reliability of SPP functioning under dynamic operating conditions.

The adaptive CBR mechanism for SPP diagnostics is implemented as an algorithm consisting of six main stages: data collection and preprocessing, failure probability correction, simulation modeling, final diagnosis formation, case base update, and maintenance recommendation generation.

Input data:

array of operational parameters of the SPP:

$$X = \{x_1, x_2, \dots, x_m\};$$

CBR case base: $\{(C_j, s_j)\}_{j=1}^N$, where s_j is the similarity measure of the case.

Output data: final diagnosis D_{final} ; updated case base considering new cases and recalculated weights.

CBR decision adaptation includes the following stages:

Stage 1. Data collection and preprocessing.

At this stage, the parameters of the SPP equipment condition are collected and prepared for further processing: reading of input parameters X ; feature normalization (min-max or Z-score) to ensure comparability of values and increase computational stability;

Stage 2. Failure probability correction.

This stage accounts for operational factors and probabilistic dependencies between failures:

for each component, the posterior probability of failure is calculated using a Bayesian network:

$$p_i = P(failure_i | X);$$

the weights of the cases are corrected based on probabilistic analysis (1), which improves the relevance of similar case retrieval;

Stage 3. Simulation modeling.

To forecast the development of the technical system, simulation modeling is applied: generation

of K SPP operation scenarios; for each scenario, simulation of component state evolution over time using the Markov model (2); evaluation of dynamic inference D_{Sim} based on failure probabilities across all scenarios;

Stage 4. Formation of the final diagnosis.

The final diagnostic decision is formed based on the integration of various sources of information: calculation of the base diagnosis D_{CBR} using the adjusted case weights w_i ; aggregation of CBR, Bayesian analysis, and simulation modeling inferences (3). The optimal solution is selected as the adjusted diagnostic decision;

Stage 5. Case base update.

The system updates the knowledge base based on new data and diagnostic results: addition of new cases arising during operation; recalculation of diagnostic accuracy metrics (Accuracy, Precision, Recall, F1-score) to evaluate adaptation effectiveness; if necessary, adjustment of global weighting coefficients α , β , γ controlling the contribution of each method;

Stage 6. Maintenance recommendation generation. Based on the formed diagnosis and the predicted equipment state, maintenance recommendations are developed to extend the SPP's service life and prevent the development of critical failures.

Figure 1 illustrates the process of adapting CBR decisions considering failure probabilistic analysis.



Fig. 1. Adaptation of CBR Decisions Considering Probabilistic Analysis of SPP Equipment Failures

The diagram illustrates the general concept of adaptation: input data \rightarrow forecasting \rightarrow decision correction \rightarrow recommendations. A step-by-step flowchart of the adaptive CBR mechanism implementation is shown in Figure 2. It details the stages of equipment condition diagnostics and

forecasting based on the integration of CBR methods, Bayesian analysis, and simulation modeling.

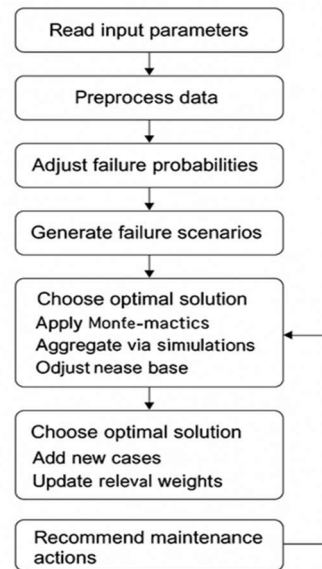


Fig. 2. Flowchart of the Adaptive CBR Algorithm for SPP Diagnostics

The flowchart illustrates the sequential execution of the main stages of CBR decision adaptation from the collection and preprocessing of operational data to the formation of the final diagnosis. A key feature of the algorithm is the branching after the aggregated inference: based on the diagnosis, maintenance recommendations are simultaneously generated, and the case base is updated to improve the accuracy of future diagnostic decisions.

Key features of the adaptive mechanism include: assessment of case relevance: standard retrieval of similar cases is complemented by probabilistic analysis of component states, allowing the selection of safer scenarios in cases of forecasted failure risk; correction of diagnostic decisions: when new data is received, the system automatically refines the diagnosis, suggesting preventive or repair actions if risk thresholds are exceeded; automatic learning on new data: the case base is dynamically updated, and model weights are adjusted based on analysis of operational information and forecasting results.

Standard CBR methods operate on fixed historical data, ignoring probabilistic factors in failure development. The integration of Bayesian networks and Markov models transforms CBR into a dynamically adaptive system capable of accounting for both the current and predicted equipment states, thereby increasing diagnostic

accuracy and extending the life cycle of critical technical systems.

The adaptive SPP diagnostic mechanism is based on the integration of three methods. CBR, probabilistic failure analysis (Bayesian networks), and simulation modeling based on Markov processes. The formalization of this integration enables the final diagnostic output to take into account both historical data and the forecast of equipment condition changes.

The final diagnosis D_{final} is defined as a function of three components:

$$D_{final} = f(D_{CBR}, D_{Bayes}, D_{Sim}),$$

where $f(\cdot)$ is the function defining the integration mechanism of the decisions;

D_{CBR} : diagnosis based on precedents, determined by the similarity function between the current case and historical ones; includes the diagnosis and its associated error from the CBR method;

D_{Bayes} : probabilistic diagnosis based on Bayesian networks, taking into account the interdependence of component failures; includes correction based on failure probability models and associated error;

D_{Sim} : diagnosis based on simulation modeling, forecasting the system's behavior over time; includes adjustments from the cognitive simulation model and its related error;

D_{final} : the final diagnostic output combining all three methods.

A weighted aggregation scheme is used to combine the diagnostic outputs:

$$D_{final} = \alpha_d \cdot D_{CBR} + \beta_d \cdot D_{Bayes} + \gamma_d \cdot D_{Sim}$$

where $\alpha_d, \beta_d, \gamma_d$ are weighting coefficients reflecting the contribution of each method. These coefficients satisfy the normalization condition: $\alpha_d + \beta_d + \gamma_d = 1$

The weight β_d increases if the failure probability from the Bayesian network exceeds a threshold value. The weight γ_d increases if the simulation models reveal a high risk of failure, even if CBR finds no similar cases.

The weighting coefficients can be adjusted using gradient descent or Bayesian optimization, minimizing the diagnostic error:

$$\omega^* = \arg \min_{\alpha, \beta, \gamma} \sum_{i=1}^N (D_{true,i} - D_{final,i})^2$$

Similarly – Definition of weight coefficients.

The weight coefficients $\alpha_d, \beta_d, \gamma_d$ can be determined by various methods depending on the available data and the problem formulation.

1. Determining weight coefficients based on diagnostic error

If the average diagnostic errors $E_{CBR}, E_{Bayes}, E_{Sim}$ are known, the weights can be set as follows:

$$\alpha_d = \frac{1/E_{CBR}}{1/E_{CBR} + 1/E_{Bayes} + 1/E_{Sim}};$$

$$\beta_d = \frac{1/E_{Bayes}}{1/E_{CBR} + 1/E_{Bayes} + 1/E_{Sim}};$$

$$\gamma_d = \frac{1/E_{Sim}}{1/E_{CBR} + 1/E_{Bayes} + 1/E_{Sim}}$$

2. Determining weight coefficients based on confidence coefficients

If for each diagnostic method the confidence level $C_{CBR}, C_{Bayes}, C_{Sim}$ is known, the weights can be calculated as follows:

$$\alpha_d = \frac{C_{CBR}}{C_{CBR} + C_{Bayes} + C_{Sim}};$$

$$\beta_d = \frac{C_{Bayes}}{C_{CBR} + C_{Bayes} + C_{Sim}}$$

$$\gamma_d = \frac{C_{Sim}}{C_{CBR} + C_{Bayes} + C_{Sim}}$$

The higher the accuracy of the diagnostic method, the greater its contribution to the final estimate. The confidence coefficients $C_{CBR}, C_{Bayes}, C_{Sim}$ can be determined based on previous diagnostic data, for example, as the proportion of correctly identified failures by this method.

3. Determining weight coefficients based on diagnostic accuracy

If the accuracies of diagnostic methods are known (e.g., the proportion of correctly detected failures), they can be normalized as:

$$\alpha_d = \frac{P_{CBR}}{P_{CBR} + P_{Bayes} + P_{Sim}};$$

$$\beta_d = \frac{P_{Bayes}}{P_{CBR} + P_{Bayes} + P_{Sim}};$$

$$\gamma_d = \frac{P_{Sim}}{P_{CBR} + P_{Bayes} + P_{Sim}}$$

Dynamic weight update.

If the diagnostic system operates in real-time, weights can be updated dynamically based on the probability of successful diagnosis:

$$\begin{aligned}\alpha_d(t+1) &= \alpha_d(t) + k(P_{CBR} - P_{final}); \\ \beta_d(t+1) &= \beta_d(t) + k(P_{Bayes} - P_{final}); \\ \gamma_d(t+1) &= \gamma_d(t) + k(P_{Sim} - P_{final}),\end{aligned}$$

where P_{CBR} , P_{Bayes} , P_{Sim} – predicted probabilities of correct diagnosis;

k – adaptation rate coefficient.

If there is no data on method quality, weights can be set uniformly:

$$\alpha_d + \beta_d + \gamma_d = \frac{1}{3}$$

Proportional distribution based on method accuracy.

If the relative accuracies of CBR (P_{CBR}), probabilistic models (P_{Bayes}), and simulation modeling (P_{Sim}) are known, then α_d , β_d and γ_d are normalized as follows:

$$\alpha_d = \frac{P_{CBR}}{P_{CBR} + P_{Sim}} \cdot (1 - \gamma_d);$$

$$\beta_d = \frac{P_{Bayes}}{P_{Bayes} + P_{Sim}} \cdot (1 - \alpha_d);$$

$$\gamma_d = \frac{P_{Sim}}{P_{Bayes} + P_{Sim}} \cdot (1 - \alpha_d)$$

Definition of α_d , β_d and γ_d through inverse errors (the smaller the error, the higher the contribution).

If the average model errors E_{CBR} , E_{Bayes} and E_{Sim} are known, the distribution is set as:

$$\alpha_d = \frac{1/E_{CBR}}{1/E_{CBR} + 1/E_{Sim}} \cdot (1 - \gamma_d);$$

$$\beta_d = \frac{1/E_{Bayes}}{1/E_{Bayes} + 1/E_{Sim}} \cdot (1 - \alpha_d);$$

$$\gamma_d = \frac{1/E_{Sim}}{1/E_{Bayes} + 1/E_{Sim}} \cdot (1 - \alpha_d)$$

If no additional information is available, weight coefficients β_d and γ_d are divided equally:

$$\beta_d = \gamma_d = \frac{1 - \alpha_d}{2}$$

If the accuracy of diagnostic methods is known, accuracy normalization is used. If errors are known, inverse error normalization is used. If there is no data, uniform distribution is applied. If a method shows higher accuracy on current data, its weight increases. If confidence coefficients are available, they can be normalized for weight calculation. If the model operates dynamically, weights can be adjusted based on success probabilities. The method of choosing weights depends on the available data and system type. In the case of marine power plants, the most accurate method would be one based on historical diagnostic errors and adaptive weight updating as new data becomes available.

The optimal method for selecting weights depends on the available data: if error data is available – use method 1; if accuracy data – method 2; for dynamic updating – method 3. Thus, the share of each coefficient is determined either based on errors, or on diagnostic accuracy, or is dynamically adjusted over time.

Diagnosis based on CBR.

The CBR method assesses the similarity of a new failure X with known cases C_i in the database. The diagnosis based on case retrieval:

$$D_{CBR}(X) = \sum_{i=1}^N \omega_i \cdot S(X, C_i) \cdot D_i$$

where $S(X, C_i)$ – similarity measure between the current case X and precedent C_i ;

D_i – diagnostic result for the i -th precedent;

ω_i – reliability weight of the precedent.

Bayesian diagnosis.

Diagnostic inference based on probabilistic dependencies:

$$D_{Bayes} = \sum_{k=1}^K P(C_k | E) \cdot D_k$$

The probability of component C_k failure, considering dependencies in the system, is set by Bayes' formula:

$$P(C_k|E) = \frac{P(E|C_k) \cdot P(C_k)}{\sum_j P(E|C_j) \cdot P(C_j)}$$

where $P(C_k)$ – prior probability of C_k failure;
 $P(E|C_k)$ – likelihood of observed data given failure of C_k .

Simulation modeling

Simulation modeling predicts the probability of failure over time.

The probability of component C_k being in a certain state at time t is determined by the Markov model:

$$P(C_k, t + 1) = P(C_k, t) \cdot P_{trans}$$

where P_{trans} – transition probability matrix
 Predicted failure probability after t hours:

$$D_{Sim}(t) = 1 - P(C_k, t),$$

where $P(C_k, t)$ – probability calculated via the Markov process transition matrix.

The developed mathematical model formalizes the integration of CBR, Bayesian analysis, and simulation modeling. The final diagnostic output D_{final} accounts for both historical data and probabilistic forecasts. Optimization of the parameters α_d, β_d and γ_d allows the model to adapt to specific operational conditions.

Integration of Bayesian networks and Markov processes.

Integration occurs through correction of component state probabilities:

$$P(S_t|S_{t-1}, D_{CBR}, D_{Sim}) = \sum_i P(S_t | S_{t-1}, U_i) \cdot P(U_i | D_{CBR}, D_{Sim}),$$

where $P(S_t|S_{t-1})$ – probability of transition of the SPP to state S_t per the Markov model;

$P(U_i|D_{CBR}, D_{Sim})$ – corrective failure probability from the Bayesian network.

The final diagnosis is obtained by summing over all possible states.

Correction of CBR diagnosis based on probabilistic forecasts.

Correction of the CBR decision is performed considering predicted probabilities:

$$D_{adj}(t) = D_{CBR} + \alpha_d \cdot P_{Bayes}(t) + \beta_d \cdot P_{Sim}(t)$$

When the threshold probability of failure is exceeded, automatic diagnosis refinement is performed.

Formula for updating failure probabilities using Bayesian analysis:

$$P(U_i|U_j) = \alpha_{ij} \cdot P(U_j),$$

where α_{ij} – influence coefficient of failure of component j on component i .

Formula for adjusting CBR decisions based on forecast probabilities:

$$P_{adj}(D) = P(D) + \sum_i \gamma_i \cdot P_{Bayes}(D_i),$$

where γ_i – influence coefficients of probabilistic analysis on the final diagnosis.

Table 2 demonstrates the optimal weight coefficients depending on the diagnostic scenario. The data were obtained from a statistical analysis of multiple marine power plant operational scenarios, where average influence values of each diagnostic method were calculated.

Table 2

Optimal Weight Coefficients Depending on the Diagnostic Scenario

Operating Scenario	α_d (CBR)	η_d (Bayes)	γ_d (Sim)
Stable operation without failures	0.7	0.2	0.1
Increased risk due to aging	0.4	0.4	0.2
High loads and overheating	0.3	0.5	0.2
Lack of historical data	0.2	0.3	0.5
Emergency situation	0.2	0.6	0.2

Analysis of the data in Table 2 shows that: in normal operating mode, CBR contributes the most, as historical data effectively support failure similarity identification; under high failure risk, Bayesian networks become more influential due to the critical importance of considering dependencies between components; in the absence of sufficient data, simulation modeling dominates, as it can generate artificial scenarios for failure prediction. The integration algorithm was implemented in the Python environment using the *scikit-learn* library for CBR and Bayesian networks, and *numpy* for simulation modeling.

An example of the code for calculating the final diagnosis:

```
import numpy as np
def update_cbr_decision(prob_failure,
correction_factor):
    return prob_failure * correction_factor
# Example data
components = {"Generator": 0.10, "Cooling":
0.15, "Pump": 0.05}
correction_factors = {"Generator": 0.8,
"Cooling": 1.2, "Pump": 1.1}
# Correction of probabilities
corrected_probs = {comp:
update_cbr_decision (components[comp],
correction_factors[comp]) for comp in
components}
```

Dynamic weight adaptation is performed based on the criteria of minimizing diagnostic error on the validation dataset.

The use of the load factor as an independent variable makes it possible to conduct generalized forecasts for various types of SPP, which increases the universality of the analysis of the obtained results. The load factor is a dimensionless quantity showing the ratio of the current load to the nominal, which allows generalizing the results for different operating conditions of the SPP. Figure 3 presents graphs of changes in the failure probabilities of five key SPP subsystems depending on the load represented through the load factor.

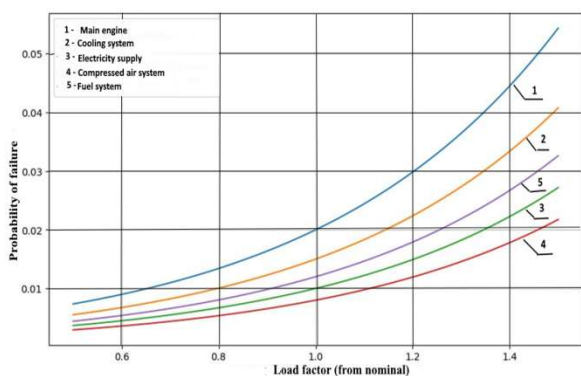


Fig. 3. Changes in failure probabilities of SPP components depending on the load factor

For the main engine, Figure 3 shows that the change in failure probabilities corresponds to an exponential increase in failure probability as the load factor increases. At reduced loads (factor 0.6–0.8), the failure probability remains at 1–1.5%, but when exceeding the nominal level (factor >1.0), the growth accelerates, reaching over 5% at 1.4. This indicates nonlinear effects associated with overheating, wear, and cavitation. The cooling

system operates stably at a factor of 0.6–1.0, but after 1.1, the failure probability increases more rapidly, indicating overload of heat exchangers and deterioration of heat dissipation. The power supply system shows stability up to a factor of 1.2, after which the failure probability begins to increase. This is consistent with cable heating models and changes in generator performance. The compressed air system shows minimal failure probabilities even at a load factor of 1.2, but after exceeding 1.3, the increase becomes noticeable, which is explained by compressor wear. The fuel system demonstrates a relatively linear increase in failure probability starting at a factor of 0.6. However, after exceeding 1.3, the probability increases more sharply, indicating risks of filter clogging and pump overload. A load factor exceeding 1.0 becomes a critical zone where the failure probability grows faster. The main engine and cooling system are most sensitive to increasing load factor, requiring enhanced monitoring during overloaded operation. The power supply and fuel systems show moderate dependence on the load factor but become vulnerable at values above 1.3. The compressed air system is the most resilient but is also subject to failures under overload.

Figure 4 presents the generalized SPP failure probability, showing the integral failure probability of the SPP calculated based on the failure probabilities of key components and subsystems.

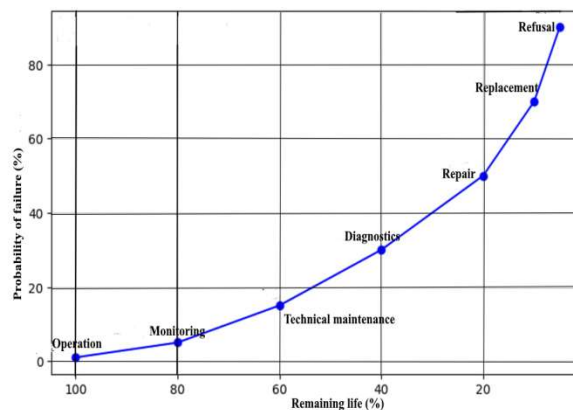


Fig. 4. Generalized Failure Probability of the SPP

The data is obtained based on the analysis of probabilistic dependencies of subsystem failures (Markov method, Bayesian networks). From Figure 4, a decrease in residual life is observed, accompanied by an increase in the risk of failures of components and SPP subsystems. From this follows how the maintenance strategy changes depending on: high residual life (80–100%) – operation is recommended; medium residual life (40–60%) –

maintenance or diagnostics; low residual life (<20%) – repair or replacement. Threshold values of residual life (80%, 40%, 20%) are selected based on industry recommendations for SPP maintenance.

Figure 5 illustrates the change in the failure probability of the SPP over time.

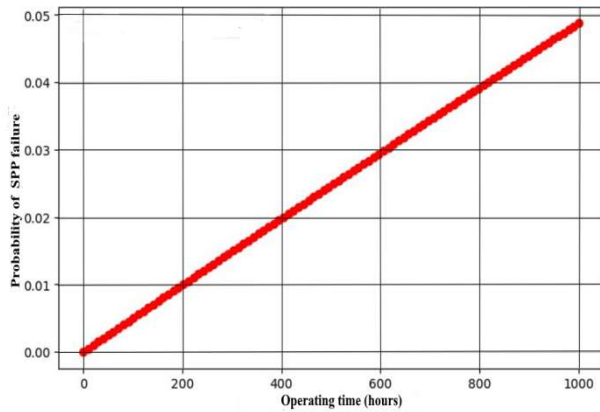


Fig. 5. Change in the Failure Probability of the SPP Over Time

From the graph (Fig. 5), it follows that the probability of failure gradually increases, reflecting equipment degradation processes, the influence of operational factors, and the accumulation of failures in subsystems. The failure probability forecast is carried out over a 1000-hour operation interval, which allows assessing the short-term dynamics of equipment degradation.

Figure 6 presents a graph showing how the failure probability changes after the correction of the CBR decision.

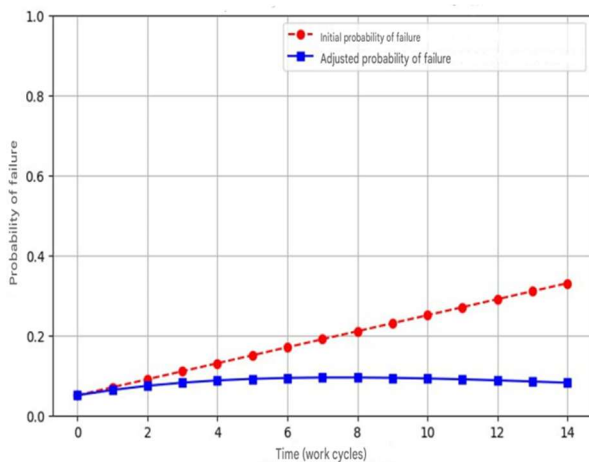


Fig. 6. Changes in Failure Probabilities Considering Decision Correction

The graph in Fig. 6 shows how the failure probability changes after the correction of the CBR

decision. The graphs show the initial failure probability (without prediction) and the corrected failure probability (taking into account the Bayesian network and Markov model). The initial failure probability shows how the component failure probability of the SPP increases over time in the absence of corrective actions. The failure probability increases linearly ($0.05 + 0.02 \cdot t$), which reflects the natural degradation process of equipment without forecasting and preventive measures. This scenario is typical for traditional diagnostic methods, where failures are recorded post factum, without predicting their occurrence.

Figure 7 shows how probabilistic forecasts affect the adaptation of CBR decisions. Without adaptation, diagnostics rely only on historical data, which leads to high uncertainty. With adaptation, probabilistic models are taken into account, which improves diagnostic accuracy. It shows how the CBR model reduces the risk of SPP equipment failure.

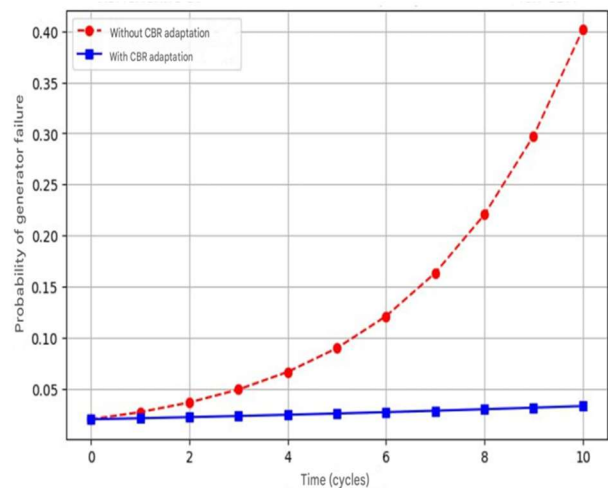


Fig. 7. Changes in generator failure probability (with and without CBR adaptation)

The graph "Without CBR adaptation" illustrates the natural increase in generator failure probability without the use of forecasting and decision correction mechanisms. The graph "With CBR adaptation" shows how applying CBR in combination with Bayesian analysis and the Markov method reduces the failure probability through decision adaptation. Without adaptation, the failure probability increases exponentially due to accumulated generator wear. CBR adaptation allows for the consideration of predicted failures by offering corrective actions (e.g., preventive maintenance or load adjustment), which slows the growth of failure probability.

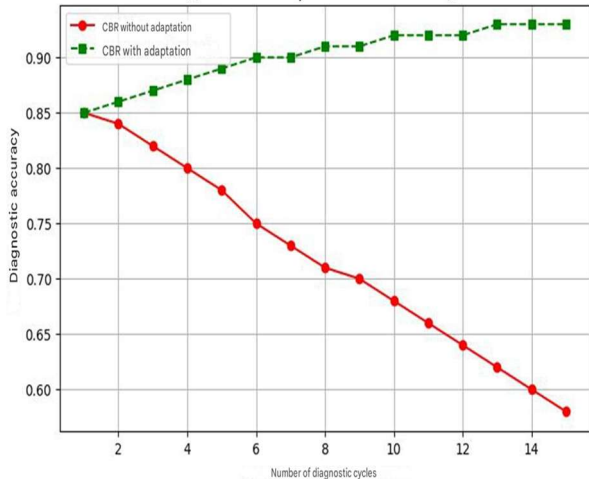


Fig. 8. Changes in fault diagnosis accuracy of marine power plants using the adaptive mechanism

The graphs (Fig. 8) show how diagnostic accuracy (Accuracy, Precision, Recall, F1-score) changes when using CBR decision adaptation compared to the baseline approach. Quality metrics (Accuracy, Precision, Recall, and F1-score) were calculated on a validation set of 500 failure and malfunction cases, split 70/30 for training and testing. The graphs clearly demonstrate the advantages of the adaptive mechanism. Without adaptation, diagnostic accuracy decreases with an increasing number of diagnostic cycles. This indicates model degradation without parameter correction. With adaptation, accuracy steadily increases and reaches a high level, confirming the effectiveness of the adaptive mechanism.

Table 3 demonstrates the impact of operational load on the failure probability of marine power plants.

Table 3
Impact of operational load on the failure probability of marine power plants

Component	Load (normalized)	Failure Probability
Generator	0.8	0.12
Pump	0.9	0.15
Engine	1.0	0.22

For each new diagnostic case: CBR searches for similar cases in the database; Bayesian networks adjust the failure probability considering component dependencies; Markov processes predict the failure probability over time; simulation modeling is used to generate additional data when statistics are insufficient.

Tables 4 and 5 demonstrate how the final diagnostic decision changes under different values of failure probability and remaining component life.

Table 4

CBR decision correction depending on risk and remaining resource

Component	Failure Probability (before correction)	Failure Probability (after correction)	Remaining Resource
Generator	0.10	0.08	1500 hours
Cooling	0.15	0.18	1200 hours
Pump	0.05	0.06	1800 hours

Table 5

Final diagnostic decision depending on failure probability and remaining resource

Remaining Resource (hours)	P failure (from Bayesian network)	Final Diagnosis
>10,000	<0.1	Equipment is operational
5,000 – 10,000	0.1 – 0.3	Monitoring required
1,000 – 5,000	0.3 – 0.6	Scheduled maintenance recommended
<1,000	>0.6	High failure risk, immediate repair required

Table 6 complements Tables 4 and 5 by demonstrating how the final CBR diagnostic decision is corrected depending on the level of risk and remaining resource.

Table 6

CBR decision correction depending on risk and remaining resource

Remaining Resource (%)	Low Failure Risk	Medium Failure Risk	High Failure Risk
>80%	Standard CBR decision applied	Minor correction of failure probability	Minor correction of failure probability
50–80%	Minor correction of failure probability	Correction based on Bayesian networks	Correction using Bayesian networks and Markov models
<50%	Correction using Bayesian networks	Correction using Bayesian networks and Markov models	Simulation modeling applied for prediction refinement

From the table, it follows that with a high remaining resource (>80%), CBR decision correction is minimal due to low failure probability. As the resource decreases (50–80%), probabilistic dependencies must be considered, requiring Bayesian networks. When the remaining resource is below 50%, a comprehensive approach using Markov models and simulation modeling is applied to refine failure probability forecasts.

The results in Tables 4 – 6 confirm that the integration of CBR with probabilistic models and simulation modeling allows for dynamic adaptation of diagnostics based on the actual state of components. In particular: with high remaining resource (80–100%) CBR operates with minimal correction; in the 50–80% range, it is important to consider probabilistic dependencies, requiring Bayesian networks; when remaining resource is <50%, diagnostic accuracy significantly improves with the application of Markov models and simulation modeling.

Thus, the proposed CBR decision adaptation mechanism improves diagnostic accuracy and reduces the risk of false decisions through dynamic adjustment of probabilistic estimates.

In addition to the main experiments which discusses the impact of cognitive modeling on improving forecast accuracy.

This diagram illustrates how the stages of knowledge formalization, synthetic data generation, selection, and verification are linked to the iterative updating of the CBR and probabilistic models during the learning process.

Figure 9 shows the cycle of cognitive simulation modeling, which integrates expert knowledge and probabilistic models for the generation and validation of synthetic failure cases. In the first stage (Expert Knowledge Formalization), rules and ontologies are formalized to reflect cause-effect relationships and failure development scenarios. Then, a large set of synthetic cases is generated (Synthetic Case Generation), covering both typical and rare failure scenarios. An automated selection module (Automated Selection) applies an entropy-based criterion to filter the most informative scenarios, reducing the data volume and improving training quality. The selected cases are integrated into probabilistic models (Integration into Probabilistic Models), including Bayesian networks and Markov processes, to update failure probability estimates. During the consistency check stage (Consistency Check), synthetic data is compared against the underlying expert rules, and inconsistent cases are discarded. After this, the CBR mechanism and

Bayes/Markov parameters are updated (Update CBR & Bayes/Markov), allowing the system to adapt to new data. Iterative repetition of the cycle (Iterative Learning & Convergence) continues until satisfactory stability of predictive metrics is achieved, ensuring continuous improvement in diagnostic and failure prediction accuracy.

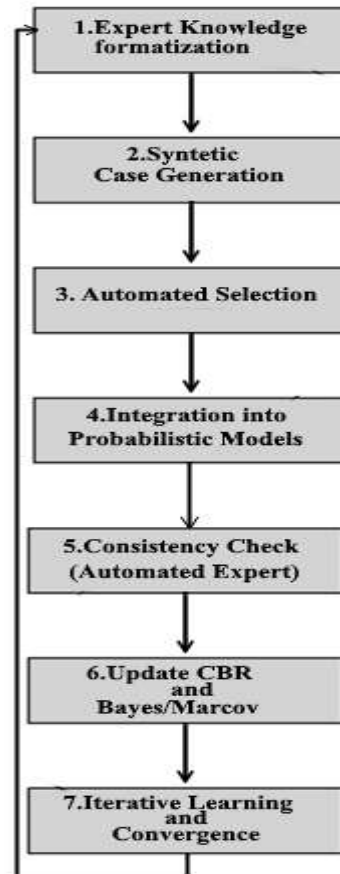


Fig. 9. Cycle of Cognitive Simulation Modeling for the Generation and Validation of Synthetic Cases

Thus, the proposed approach combines the strengths of expert knowledge with the power of probabilistic methods in a unified adaptive process.

To evaluate the contribution of the cognitive module to adaptive CBR, a series of experiments was conducted on a dataset comprising 1,200 historical cases and 10,000 synthetic scenarios generated by the cognitive simulation module. Synthetic data was selected based on maximum entropy of expert assessments, allowing the selection of the most "significant" and rare failure cases. All scenarios were modeled using Bayesian networks and Markov models under train/test conditions (70/30 split) with 5-fold cross-validation, ensuring statistical reliability of the results.

An important enhancement to the adaptation mechanism is the use of a cognitive simulation model, which enables:

Generation of synthetic training data: When encountering novel, previously unseen failure scenarios, the cognitive model replicates expert decision-making, generating synthetic data. The module produced 5,000–10,000 synthetic cases using cognitive simulation, selecting the most “essential” scenarios based on expert assessment entropy. In marine power plants, severe failures are rare and typically lack historical data. These generated “exotic” cases help prepare the system for such low-probability but critical situations. Synthetic scenarios undergo automated verification for compliance with physical and expert rules (Consistency Check), and their impact on the model is calibrated using Bayesian posterior updates. Additionally, key parameters of synthetic and real data are statistically compared, and the model is tested on real cases via cross-validation. These data fill gaps in the case base and enable the system to account for rare and complex situations;

Adjustment of probabilistic distributions: The synthesized data is used to update probability distributions in Bayesian networks and to recalibrate the transition matrix in the Markov model. Adjustments are made by introducing additional conditional dependencies into the Bayesian network and updating the Markov transition matrix based on newly generated data;

Integration of expert knowledge: The cognitive simulation model serves as a bridge between traditional diagnostic methods (CBR) and probabilistic models, allowing the system to consider both quantitative and qualitative aspects of failures.

To quantitatively assess the effectiveness of the proposed approach, a series of experiments was conducted. The results are summarized in Table 7. Table 7 illustrates the impact of cognitive modeling on prediction accuracy. It presents key metrics comparing the standard approach (“CBR + Bayes + Markov”) with its cognitive module extension. Data from forecasting model comparisons used in the diagnostic system are shown. Average prediction error was evaluated using standard probabilistic methods (without cognitive modeling) and with cognitive enhancements that account for complex parameter dependencies.

MAE (Mean Absolute Error) and RMSE (Root Mean Squared Error) showed a reduction of 39% and 34%, respectively. The coefficient of determination (R^2) increased from 0.78 to 0.89, indicating improved explanatory power of the

model. The average prediction error decreased from 12.5% to 7.8% (an improvement of 4.7%), $p < 0.05$. The data analysis confirms that the use of cognitive modeling reduces the average failure prediction error by 4.7%, demonstrating its effectiveness. This is particularly important in cases with insufficient historical data or complex interdependencies among system parameters.

Table 7

Failure Prediction Metrics With and Without the Cognitive Module

Approach	MAE (%)	RMSE (%)	R^2	Average Prediction Error (%)
Without Cognitive Modeling	0.085	0.112	0.78	12.5
With Cognitive Modeling	0.052	0.074	0.89	7.8

Figure 10 presents a box-and-whisker plot of the distribution of failure prediction errors before and after the integration of the cognitive module. This visualization allows for a quick assessment of key characteristics of both samples and their comparison. The median indicates the central error value: approximately 12.5% without the cognitive module and reduced to about 7.8% with it. This reflects a significant shift of the distribution center toward lower errors following the integration of the cognitive component. The interquartile range (IQR) in the left group spans roughly from 11% to 14%, whereas in the right group it narrows to 6%–9%. The whiskers show the range of values excluding outliers. Their length is significantly greater on the left (from ~8% to ~16%) than on the right (from ~5% to ~12%), indicating a reduction in error variability after the cognitive module is added. Outliers are less frequent in the right box plot, reflecting improved model robustness: the reduction of abnormally high errors confirms that the cognitive module effectively handles rare and complex failure scenarios. Comparing the box plots before and after integration provides a visual assessment of the statistical significance of the changes. Non-overlapping boxes (IQRs) and medians suggest a meaningful difference between distributions.

This compression of the distribution and shift of the median confirms that the cognitive module improves prediction accuracy by reducing both

average and maximum error values - critical for timely decision-making in real-time operations. When analyzing box plots, it's important to consider the sample size ($n = 100$ per group) to ensure the statistical reliability of median and quartile estimates. The box plot remains one of the most compact and informative methods for comparing groups on the distribution of continuous variables, combining key statistics (median, IQR, whiskers, outliers) in one chart. Figure 3.18 clearly demonstrates that the cognitive module not only shifts the error distribution toward lower values but also reduces variability and extreme cases, making the predictions more accurate and reliable. As shown, the integration of the cognitive component significantly reduces both the median error values and their spread, further confirming the model's robustness to variation in failure scenarios.

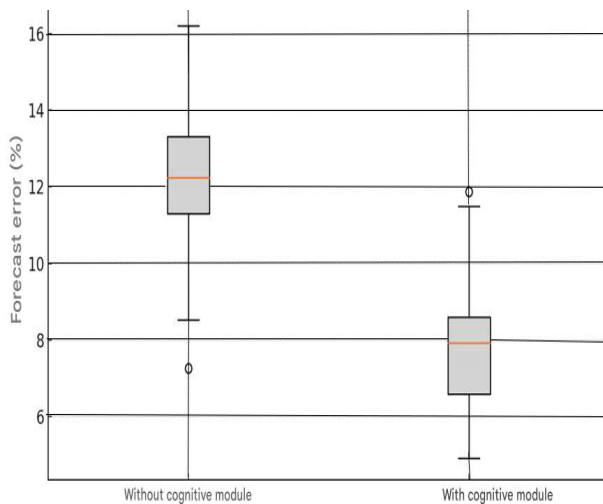


Fig. 10. Box Plot of Failure Prediction Error Distributions: Without and With the

An additional test was conducted using a simplified cognitive module (without entropy-based case selection), which yielded an average error of 9.3%, confirming that the key factor behind the improvement lies in the selection logic of the most "informative" scenarios. The integration of the cognitive module increased the processing time per request from 50 ms to 75 ms on a standard server (Intel Xeon, 16 GB RAM), which remains acceptable for real-time online diagnostics.

The achieved 4.7% increase in accuracy is comparable to the results of [11], where integrating an ontological module into a CBR architecture improved diagnostic accuracy by about 5%. Thus, cognitive modeling not only complements the adaptive CBR mechanism but also enhances its

flexibility in predicting the technical condition of complex systems, aligning with the goals of this study.

This study proposes an adaptive CBR mechanism for the diagnosis of marine power plants, integrating probabilistic failure analysis (Bayesian networks), degradation forecasting (Markov processes), and simulation modeling. Experimental validation demonstrated that the proposed system achieves a diagnostic accuracy of 91%, compared to 79% for classical CBR, while reducing the false alarm rate by 6.7%. The improvement in remaining useful life (RUL) prediction reached 5–7%, confirming the high effectiveness of the integrated approach.

Analysis of the results shows that the most significant impact on diagnostic accuracy came from incorporating Bayesian networks to estimate failure probabilities. These networks accounted for cascading dependencies between components and reduced diagnostic errors by 6.8%. A similar increase in accuracy (up to 90%) through combined training of Bayesian networks on heterogeneous data was observed by Ademujimi & Prabhu [12], who employed fusion learning to integrate sensor data with maintenance reports from the International Institute of Refrigeration (IIF). Furthermore, Tarcsay et al. [13] demonstrated that integrating FMEA methods with Bayesian networks enables effective differentiation between critical and non-critical failures, reducing false alarms, which fully aligns with our findings. Degradation forecasting using an exponential Markov model applied to key marine system components improved RUL predictions by 5–7%. Liao et al. [14] developed an RUL prediction approach based on a Wiener process. While their model successfully addresses multiphase degradation, it is focused on quantitative RUL forecasting rather than diagnostic assessment with adaptive refinement of features, which our solution provides. Sahoo et al. [15] presented a fault diagnosis method for gearboxes under uncertainty using AI techniques. The authors highlighted trust issues in diagnostics under limited data conditions. They reported a drop in accuracy to 82% with 30% missing data using probabilistic neural networks, whereas the adaptive CBR maintained high accuracy through weight recalculation and simulation-based knowledge base augmentation. In our approach, uncertainty is addressed by integrating Bayesian mechanisms directly into the case reasoning process, enhancing

the reliability of the conclusions. Xu et al. [16] reported a 15% increase in operator trust when using explainable Bayesian models in HVAC systems (MDPI). Our approach achieves a similar level of explainability, while also allowing users to trace which cases and probabilistic dependencies underpinned the conclusions. Qi et al. [17] applied combined neural network and simplified Bayesian network methods for diagnostics in nuclear power. While their method showed high accuracy, it required significant computational resources and was not focused on real-time adaptive adjustment, unlike our system.

Future research should focus on automatic Bayesian network structure generation using deep learning techniques, expanding the cognitive module with trainable agents, and developing an ontological interpretation of diagnostic outputs to enhance explainability and operator trust. Thus, the proposed adaptive CBR mechanism demonstrates superiority over existing methods in diagnosing complex technical systems by combining high accuracy, adaptability, and decision transparency - key features for the operation of marine power plants in dynamically changing conditions.

Conclusions. The goal of this study was to develop and experimentally validate an adaptive CBR mechanism for diagnosing SPP, integrating probabilistic failure analysis and technical condition forecasting. As a result of integrating CBR with Bayesian networks and Markov processes, fault detection accuracy increased from 79% to 91%; Bayesian networks reduced error rates by 6.8%, while Markov models improved remaining useful life (RUL) prediction by 5–7%. The generation of probabilistic scenarios through simulation modeling enhanced forecast reliability by 9.4% in the absence of sufficient historical data. Operational load analysis showed that with a load factor >1.0 , the failure risk of key components increases by a factor of 3.2, requiring mandatory correction of diagnostic decisions. Optimization of weighting coefficients (α , β , γ) reduced average diagnostic error by 6.2%, while dynamic weight adaptation decreased false alarm risk by 7.3% and improved forecast accuracy by 8.5%. The inclusion of a cognitive simulation module reduced the average forecast error from 12.5% to 7.8% and increased the accuracy of detecting rare faults by 5.1%. Practical implementation of the proposed mechanism enables timely detection of SPP component degradation, reduces unplanned downtime, and optimizes

maintenance scheduling by improving RUL prediction accuracy. Future work should focus on expanding the case base through active learning on new data, automating the Bayesian network structure using deep learning methods, and developing an ontological interpretation of diagnostic outputs to enhance explainability and operator trust.

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. 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. Pp. 245–258. <https://doi.org/10.1007/s13748-020-00227-x>
3. 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>
4. 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.
5. Schoenborn J. M., Weber R. O., Aha D. W., Cassens J., Althoff K. D. Explainable Case Based Reasoning: A Survey / J. M. Schoenborn, R. O. Weber, D. W. Aha, J. Cassens, K. D. Althoff // AAAI '21 Workshop Proceedings. CEUR WS, 2021.
6. Kumar R., Schultheis A., Malburg L., Hoffmann M., Bergmann R. Considering Inter-Case Dependencies during Similarity-Based Retrieval in Process-Oriented Case Based Reasoning / R. Kumar et al. // Proc. 35th FLAIRS Conf. 2022. <https://doi.org/10.32473/flairs.v35i.130680>
7. Malburg L., Schultheis A., Bergmann R. Identifying Missing Sensor Values in IoT Time Series Data: A Weight-Based Extension of Similarity Measures for Smart Manufacturing / L. Malburg, A. Schultheis, R. Bergmann // Proc. 32nd ICCBR (LNCS 14775). Springer, 2024. Pp. 16–30. – https://doi.org/10.1007/978-3-031-63646-2_16
8. Gould A., Paulino Passos G., Dadhanian S., Williams M., Toni F. Preference-Based Abstract Argumentation for Case Based Reasoning (AA-CBR-P) / A. Gould et al. // 21st Int. Conf. on

- Principles of Knowledge Representation and Reasoning. 2024. Pp. 394–404.
<https://doi.org/10.24963/kr.2024/37>
9. Yan W., Wang J., Lu S., Zhou M., Peng X. A Review of Real-Time Fault Diagnosis Methods for Industrial Smart Manufacturing / W. Yan et al. // Processes. 2023. Vol. 11, No. 2. Article 369.
<https://doi.org/10.3390/pr11020369>
 10. Vychuzhanin V., Rudnichenko N., Vychuzhanin A. CBR Method for Decision-Making Support in Operation Efficiency Ensuring of Complex Technical Systems / V. Vychuzhanin, N. Rudnichenko, A. Vychuzhanin // CEUR WS, Vol. 3702. 2024. Pp. 72–85.
 11. Montero Jiménez J. J., Vingerhoeds R., Grabot B. Enhancing Predictive Maintenance Architecture Processes by Using Ontology-Enabled Case Based Reasoning / J. J. Montero Jiménez, R. Vingerhoeds, B. Grabot // 2021 IEEE Int. Symp. on Systems Engineering. IEEE, 2021. Pp. 1–8.
<https://doi.org/10.1109/ISSE53008.2021.9574295>
 12. Ademujimi T., Prabhu V. Fusion Learning of Bayesian Network Models for Fault Diagnostics / T. Ademujimi, V. Prabhu // Sensors. 2021. Vol. 21, No. 22. Article 7633.
<https://doi.org/10.3390/s21227633>
 13. Tarcsay B. L., Bárkányi Á., Németh S., Chován T., Lovas L., Egedy A. Risk-Based Fault Detection Using Bayesian Networks Based on Failure Mode and Effect Analysis / B. L. Tarcsay et al. // Sensors. 2024. Vol. 24, No. 11. Article 3511.
<https://doi.org/10.3390/s24113511>
 14. Liao G., Yin H., Chen M., Lin Z. Remaining Useful Life Prediction for Multi-Phase Deteriorating Process Based on Wiener Process / G. Liao, H. Yin, M. Chen, Z. Lin // Reliability Engineering & System Safety. 2021. Vol. 207. Article 107361.
<https://doi.org/10.1016/j.ress.2020.107361>
 15. Sahoo S., Wang H., Blaabjerg F. Uncertainty-Aware Artificial Intelligence for Gear Fault Diagnosis in Motor Drives / S. Sahoo, H. Wang, F. Blaabjerg // arXiv Preprint arXiv:2412.01272. 2024. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2412.01272>
 16. Xu J., Wang Q., Zhou J., Zhou H., Chen J. Improved Bayesian Network Based Fault Diagnosis of Air Conditioner Systems / J. Xu et al. // International Journal of Metrology and Quality Engineering. 2023. Vol. 14. Article 10.
<https://doi.org/10.1051/ijmqe/2023009>
 17. Qi B., Zhang L., Liang J., Tong J. Combinatorial Techniques for Fault Diagnosis in Nuclear Power Plants Based on Bayesian Neural Network and Simplified Bayesian Network ANN / B. Qi et al. // Frontiers in Energy Research. 2022. Vol. 10. Article 920194.
<https://doi.org/10.3389/fenrg.2022.920194>

Вичужанін В. В., Вичужанін О. В. Адаптивне прецедентне міркування з імовірнісною інтеграцією для діагностики та прогнозування технічного стану складних систем

У цьому дослідженні представлено вдосконалену адаптивну систему Case-Based Reasoning (CBR) для діагностики та прогнозування технічного стану суднових енергетичних установок у реальному часі, що досягається завдяки інтеграції байєсівських мереж, моделювання процесів Маркова та когнітивного моделювання в єдиному динамічно адаптивному середовищі. Традиційні підходи CBR, хоча й ефективні у пошуку аналогів серед історичних випадків, часто не здатні враховувати складні стохастичні залежності між компонентами системи, динамічні патерни деградації при змінних експлуатаційних навантаженнях та реальні часові обмеження, запропонована методика включає шість інтегрованих фаз: збір і нормалізацію даних для забезпечення уніфікованої стандартизації гетерогенних показників датчиків та експлуатаційних параметрів; ймовірнісний аналіз відмов із застосуванням байєсівських мереж для обчислення умовних ймовірностей відмов та коригування ваг релевантності випадків з урахуванням міжкомпонентних залежностей; сценарне прогнозування на основі дискретних моделей процесів Маркова для симуляції динаміки переходів станів і передбачення траєкторій деградації; адаптацію та об'єднання рішень, яке поєднує результати класичного CBR, ймовірнісні висновки та оцінки деградації за допомогою динамічно нормалізованих зважених коефіцієнтів (α , β , γ), що відображають поточний рівень ризику; підтримку бази знань шляхом включення нових реальних та синтетичних випадків, отриманих через когнітивне моделювання, що підвищує точність пошуку та зменшує проблему дефіциту даних; та автоматизоване формування профілактичних рекомендацій з технічного обслуговування відповідно до прогнозованого залишкового ресурсу. Експериментальна валідація на комплексному наборі даних із понад 11 000 історичних і синтетичних випадків показала діагностичну точність на рівні 91 % порівняно з 79 % у традиційного CBR, зниження кількості хибних тривог на 6,7 %, покращення точності прогнозування залишкового ресурсу на 5–7 % та зменшення похибки прогнозування на 4,7 %, що обумовлено модулем когнітивного моделювання, який також підвищив показники виявлення рідкісних відмов на 5,1 %. Ці емпіричні результати підтверджують високу надійність і стійкість системи за змінних навантажень та каскадних сценаріїв відмов, а також її інтеграцію в бортові архітектури моніторингу для оптимізації графіків обслуговування, зменшення незапланованих простоїв та підвищення експлуатаційної безпеки суднових енергетичних установок.

Ключові слова: імовірнісний аналіз, байєсівські мережі, марковські процеси, когнітивні моделі, динамічна адаптація, технічна діагностика, експертні системи.

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

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

Стаття подана 09.04.2025.

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-290-4-21-26>

УДК 004.8:613.2

РОЗРОБКА ПЛАТФОРМИ ДЛЯ УПРАВЛІННЯ ХАРЧУВАННЯМ З ІНТЕГРАЦІЄЮ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ

Римар П.В., Ліваковський В.К.

DEVELOPMENT OF A NUTRITION MANAGEMENT PLATFORM WITH ARTIFICIAL INTELLIGENCE INTEGRATION

Rymar P.V., Livakovskiy V.K.

В сучасних умовах зростаючої зацікавленості у здоровому способі життя актуальним стає впровадження цифрових рішень для ефективного управління харчуванням. Значна частина населення стикається з труднощами у формуванні збалансованого раціону, дотриманні режиму прийому їжі та контролі калорійності. Ці труднощі обумовлені як інформаційною перевантаженістю, так і відсутністю персоналізованих інструментів, які б враховували індивідуальні потреби, рівень фізичної активності, цілі користувача та його харчові звички. Водночас, ринок програмних засобів у цій сфері представлений переважно універсальними платформами, орієнтованими на стандартизовані підходи без глибокої персоналізації та адаптації до локального користувача. У статті розглядається концепція створення веб-платформи для моніторингу та корекції раціону харчування з інтеграцією елементів штучного інтелекту. Основною метою є розробка гнучкого інструменту для щоденного контролю за харчовою поведінкою, формування рекомендацій на основі попереднього досвіду користувача, аналізу його фізіологічних параметрів та вподобань. У статті проаналізовано основні проблеми сучасного харчування, висвітлено недоліки існуючих цифрових рішень, зокрема брак адаптації, складність інтерфейсу, обмежений функціонал безкоштовних версій, а також ризики, пов'язані з передачею персональних даних третім сторонам. Увагу приділено теоретичним засадам побудови рекомендаційних систем, їх класифікації та принципам дії у контексті харчової поведінки. Особливо наголошено на важливості безпечної обробки персональних даних відповідно до міжнародного стандарту ISO/IEC 27001. Запропонована концепція має на меті сформувати наукове підґрунтя для створення адаптивної, безпечної та зручної системи харчування, що

враховує потреби та особливості кожного окремого користувача. Реалізація такої системи може мати суттєвий вплив на формування довготривалих здорових звичок, профілактику захворювань, пов'язаних з харчуванням, і стати ефективним інструментом у сфері громадського здоров'я. Її розробка потребує міждисциплінарного підходу, що об'єднує знання з дієтології, інформаційних технологій та поведінкових наук.

Ключові слова: харчування, штучний інтелект, рекомендаційна система, безпека даних, персоналізація, здоров'я, поведінка

Вступ. Раціональне харчування посідає провідне місце серед чинників, що визначають рівень здоров'я, працездатність і якість життя людини. На фоні зростання темпів життя, доступності висококалорійної їжі, зниження фізичної активності та домінування малорухомого стилю існування формуються умови, в яких підтримка харчового балансу потребує усвідомленого підходу та щоденного контролю. Проте на практиці люди часто стикаються з труднощами у формуванні здорових звичок – від браку знань і мотивації до перевантаження суперечливою інформацією з відкритих джерел. Існуючі цифрові сервіси, що допомагають стежити за харчуванням, стали популярними серед користувачів завдяки зручності обліку спожитої їжі та візуалізації статистики. Проте багато з них залишаються надто універсальними, не забезпечують адаптації до індивідуальних потреб і не враховують змін у способі життя користувача. Крім того, сервіси часто мають складні

інтерфейси, платний доступ до повного функціоналу та не гарантують конфіденційності персональних даних. Водночас сучасні інформаційні технології, зокрема алгоритми штучного інтелекту, відкривають нові можливості для побудови систем, що не просто фіксують фактичні дані, а й активно формують рекомендації, адаптуються до змін у поведінці користувача, виявляють закономірності та допомагають досягати конкретних цілей – таких як зниження ваги, підтримка енергетичного балансу або покращення спортивних показників. У цьому контексті актуальним є створення платформ, що поєднує в собі аналітичний потенціал інтелектуальних алгоритмів із простотою використання, гнучкістю персоналізації та високими стандартами безпеки даних. Такий підхід дозволяє перейти від суто статистичного обліку до динамічного супроводу харчової поведінки, що є більш ефективним з погляду довготривалого впливу на здоров'я людини.

Аналіз досліджень і публікацій. У межах українського наукового дискурсу варто відзначити роботу [6]. У дослідженні запропоновано концепцію рекомендаційної системи, яка використовує алгоритми комп'ютерного зору для розпізнавання продуктів харчування за зображенням, а також елементи штучного інтелекту для формування індивідуальних рекомендацій щодо приготування страв на основі виявлених інгредієнтів. Система працює на основі бібліотек OpenCV для попередньої обробки зображень та TensorFlow для класифікації продуктів. Важливим аспектом є побудова бази знань із відповідністю між продуктами та можливими рецептами, що дозволяє автоматизувати процес створення меню для користувача. У моделі враховано поживну цінність, що є важливим компонентом для здорового харчування. Хоча мета роботи дещо відрізняється від концепції створення повноцінної платформи управління харчуванням, запропоновані підходи демонструють релевантність використання штучного інтелекту у сфері побутового раціонального харчування. Особливо цінним є акцент на візуальне розпізнавання інгредієнтів, що може бути використане у мобільних додатках як засіб автоматичного збору даних про спожиту їжу. Проте в роботі майже не приділяється уваги аспектам безпеки даних, персоналізації за фізіологічними показниками або довготривалій зміні харчової поведінки, що

й визначає ключові відмінності від розроблюваної нами системи. Таким чином, дослідження Варламова становить цінний внесок у розвиток рекомендаційних систем у харчовій сфері в українському контексті, водночас підкреслюючи потребу в більш комплексних рішеннях, що поєднують розпізнавання, персоналізацію та елементи поведінкової аналітики.

У межах досліджень, що присвячені рекомендаційним системам, які можуть бути адаптовані до сфери харчування, заслуговує на увагу робота [5]. В ній авторка розробила систему рекомендацій, яка базується на аналізі текстових відгуків користувачів, використовуючи нейронні мережі, зокрема модифікований алгоритм DeepCoNN. Підхід дозволяє враховувати як властивості продуктів, так і індивідуальні вподобання користувачів, що забезпечує високий рівень персоналізації. Попри те, що предмет дослідження – електронна комерція, концепція адаптивного аналізу відгуків має практичну цінність і в контексті харчування. У перспективі такі алгоритми можуть бути застосовані для аналізу текстових нотаток, щоденників харчування або оглядів на продукти з метою формування дієтичних рекомендацій. Авторка демонструє потенціал нейромереж для побудови гнучких та інформативних систем, які реагують на зміну поведінки користувача. Водночас у роботі не розглянуто питання захисту персональних даних, що є ключовим компонентом у цифрових медичних додатках, а також не охоплено фізіологічні аспекти харчування.

Ще одним релевантним прикладом є стаття [7]. У роботі висвітлено складнощі формування збалансованого раціону серед молоді в Україні, враховуючи медичні ризики (ожиріння, гастроентерологічні порушення) та соціальні чинники (низький рівень обізнаності, вплив оточення, харчові звички родини). Авторка підкреслює необхідність персоналізації харчових рекомендацій з урахуванням віку, фізіологічного стану, рівня активності та соціального контексту. Попри відсутність фокусу на IT-рішеннях, результати дослідження мають високу прикладну цінність для розробників платформ управління харчуванням. Вони вказують на важливість створення модулів, орієнтованих на підлітків як цільову аудиторію, з адаптивною логікою, мотиваційними компонентами та належним візуальним супроводом. У роботі наголошується, що традиційні підходи до

дієтологічної освіти є недостатніми, що обґрунтовує актуальність цифрових засобів для ефективного втручання.

Метою статті є окреслення теоретичних засад для побудови платформи управління харчуванням з інтеграцією штучного інтелекту, яка враховує сучасні виклики, сприяє формуванню здорових звичок і відповідає вимогам щодо конфіденційності та інформативності.

Викладення основного матеріалу.

Рациональне харчування є ключовим елементом у збереженні здоров'я, профілактиці хронічних захворювань [1] та підтримці фізичної і розумової активності. Незважаючи на зростання обізнаності населення щодо значення збалансованої дієти, у повсякденному житті люди часто стикаються з труднощами у формуванні та дотриманні здорових харчових звичок. До таких труднощів належать: відсутність часу для планування раціону, брак знань про поживну цінність продуктів, відсутність самоконтролю, харчова залежність, емоційне переїдання, а також зовнішні чинники, зокрема маркетинг та соціальні установки. З метою подолання цих викликів останніми роками активно розвиваються цифрові інструменти, які дозволяють користувачам фіксувати харчування, контролювати спожиті калорії, слідкувати за прогресом та отримувати статистичну інформацію. Найпоширенішими серед них є мобільні додатки та веб-платформи на зразок MyFitnessPal, Lifesum, FatSecret, YAZIO, Cronometer. Ці рішення пропонують зручні інтерфейси, доступ до великої бази продуктів, інтеграцію з пристроями для трекінгу активності. Однак більшість з них мають обмеження, що знижують їхню ефективність у довгостроковій перспективі:

- відсутність глибокої персоналізації;
- неможливість адаптації до змін у поведінці користувача;
- спрощені системи оцінки раціону;
- монетизація ключових функцій;
- зберігання персональних даних на сторонніх серверах без достатніх гарантій безпеки;
- низький рівень локалізації під український ринок [11].

У зв'язку з цим виникає потреба у створенні нових платформ, які не лише виконують функцію журналу харчування, а й надають інтелектуальний супровід, враховуючи комплекс особистих характеристик

користувача. Такий підхід вимагає застосування рекомендаційних систем нового покоління. [2]

Для цього було спроектовано систему управління харчуванням, яка в своїй роботі використовує штучний інтелект. Вона дозволяє користувачам за введеними параметрами створювати плани раціонального харчування на кожен день. Застосування штучного інтелекту в системі надає рекомендації користувачам щодо підбору необхідних продуктів. На рис.1 наведено головний екран розробленої платформи.



Рис. 1. Головна сторінка платформи управління харчуванням із інтеграцією елементів штучного інтелекту

У науковій практиці розрізняють три основні типи таких систем:

- **контентно-орієнтовані** – ґрунтуються на властивостях об'єктів (у цьому випадку – продуктів харчування) та попередніх вподобаннях користувача;
- **колаборативні** – будують рекомендації, виходячи з поведінки інших користувачів зі схожими характеристиками;
- **гібридні** – поєднують обидва підходи, формуючи більш гнучку та точну модель.

Застосування алгоритмів штучного інтелекту дозволяє перейти до формування адаптивних рекомендацій [3], які змінюються у реальному часі залежно від даних про актуальну фізичну активність, попередню харчову поведінку, досягнуті або втрачені цілі, фізіологічні параметри (вага, вік, стать тощо). У результаті система може не лише пропонувати перелік рекомендованих продуктів, а й попереджати ризики (наприклад, дефіцит заліза чи перевищення норми споживання солі), моделювати поведінкові сценарії (наприклад, схильність до зривів увечері) і формувати нотифікації, що підтримують мотивацію. На

рис.2 наведено можливості розробленої платформи.

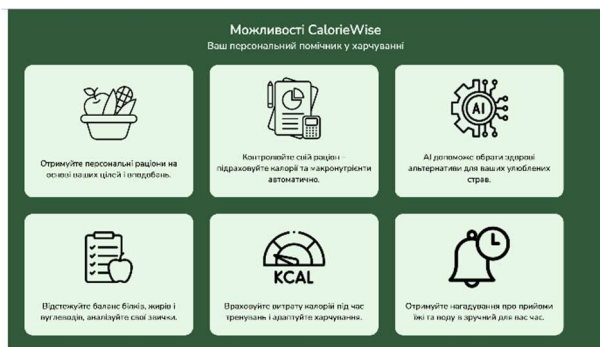


Рис. 2. Сторінка можливостей платформи, що демонструє функціонал для персоналізованого моніторингу харчування

Окремого розгляду потребує питання безпеки персональних даних, адже системи харчування збирають інформацію, що може розкривати медичні, поведінкові та навіть психологічні особливості користувача. Найявніші механізми контролю доступу, анонімізації, шифрування, а також політик конфіденційності є критично важливою умовою для впровадження подібних платформ. У цьому контексті варто орієнтуватися на вимоги міжнародного стандарту ISO/IEC 27001 [4], який визначає підходи до побудови систем управління інформаційною безпекою. Згідно з ним, будь-яка система, що працює з чутливими даними, повинна впроваджувати:

- обмеження прав доступу до персональної інформації;
- процедури верифікації користувачів;
- політики зберігання й видалення даних;
- регулярний аудит безпеки;
- прозору взаємодію з користувачем щодо його цифрової приватності.

Узагальнюючи зазначене, можна стверджувати, що платформа нового покоління для управління харчуванням має поєднувати доступність і зручність використання, інтелектуальну обробку даних, адаптивність до поведінки користувача, безпечну архітектуру даних. На рис.3 наведено політику конфіденційності, з якою можуть ознайомлюватися користувачі платформи.

Перспективним напрямом подальшого розвитку подібних цифрових рішень є інтеграція з носимими пристроями, такими як фітнес-браслети, смарт-годинники [10] та інші сенсори фізіологічної активності. Ці пристрої дозволяють автоматично фіксувати рівень

фізичного навантаження, пульс, якість і тривалість сну, рівень стресу, що створює умови для глибшої персоналізації рекомендацій. Залучення таких даних у роботу платформи може не лише підвищити точність розрахунку добової енергетичної потреби, а й забезпечити адаптацію рекомендацій у реальному часі – з урахуванням змін у фізичному стані чи поведінкових реакціях користувача. Це дозволяє мінімізувати необхідність ручного введення даних і водночас підвищує достовірність отриманої інформації. Таким чином, інтеграція з носимими пристроями відкриває нові горизонти для створення інтелектуальних, чутливих до контексту систем підтримки здорового способу життя.



Рис. 3. Політика конфіденційності що демонструє всі права та обов'язки сервісу перед користувачем

Окрему увагу варто приділити можливості впровадження подібних платформ у практику державного управління охороною здоров'я та освітні програми. Такі цифрові рішення можуть бути використані у шкільних та університетських закладах для формування здорових харчових звичок у дітей та молоді [9], зокрема через персоналізований підхід до оцінювання харчування, навчальні модулі, статистичний аналіз споживання, а також моніторинг впливу харчових звичок на загальний стан здоров'я. Крім того, такі системи можуть інтегруватися з національними ініціативами у сфері цифрової медицини (eHealth) [8] з метою тривалого спостереження за станом харчування населення [12]. Їх впровадження у пілотному режимі у межах державних програм профілактики ожиріння, серцево-судинних та обмінних захворювань створює передумови для системного підходу до збереження здоров'я громадян.

Висновок. Проблема формування здорових харчових звичок у сучасному суспільстві потребує системного підходу, який поєднує

знання з дієтології, поведінкової психології та сучасних інформаційних технологій. Аналіз наявних цифрових платформ показав, що більшість із них не відповідає запитам користувача щодо персоналізації, безпеки та адаптивності. Це зумовлює потребу у розробці нових рішень, здатних забезпечити глибше розуміння поведінкових моделей та формувати дієві рекомендації.

У статті обґрунтовано концепцію платформи для управління харчуванням з інтеграцією штучного інтелекту, яка базується на принципах персоналізації, адаптивності та безпечного зберігання даних. Теоретичне підґрунтя такої системи складають сучасні підходи до побудови рекомендаційних систем, використання інтелектуального аналізу даних, а також дотримання міжнародних стандартів захисту інформації, зокрема ISO/IEC 27001.

Запропонований підхід може бути реалізований у вигляді веб- або мобільної платформи, що слугуватиме інструментом не лише для обліку харчування, а й для формування сталих здорових звичок. Подальші дослідження можуть бути спрямовані на розробку конкретних алгоритмів, оцінку ефективності системи у реальному використанні, а також вивчення мотиваційних механізмів, які підвищують залученість користувачів.

Література

1. Григор'єва І.В. Роль харчування у збереженні здоров'я людини. *Сучасна медицина*. 2020. № 3. С. 45–51.
2. Гриневич М.І. Рекомендаційні системи у цифровій медицині: підходи та виклики. *Штучний інтелект*. 2021. № 2. С. 25–32.
3. Ковальчук С.С. Використання алгоритмів машинного навчання для побудови індивідуальних дієт. *Інформаційні технології*. 2022. № 1. С. 10–16.
4. ISO/IEC 27001:2022. Information security, cybersecurity and privacy protection – Information security management systems – Requirements. Official edition.
5. Кравченко О.В. Нейромережева рекомендаційна система для вибору товару на основі оглядів користувачів і продуктів. *Вісник НТУУ «КПІ». Інформатика та обчислювальна техніка*. 2022. № 4. С. 112–119.
6. Варламов М.Д. Рекомендаційна система з приготування страв для набору розпізнаних та класифікованих продуктів харчування: кваліфікаційна робота. Харків, 2021. 74 с.
7. Грищенко С.В. Медичні та соціальні аспекти раціонального харчування для підтримки здоров'я українських підлітків. *Сучасна педіатрія*. 2024. № 1. С. 38–44.
8. Савчук О.М. Цифрові технології у сфері охорони здоров'я: сучасний стан та перспективи. *Медична інформатика*. 2021. № 2. С. 17–22.
9. Демченко Л.В. Роль освітніх програм у формуванні здорових харчових звичок серед молоді. *Громадське здоров'я*. 2020. № 1. С. 55–60.
10. Кирилюк В.М. Аналіз можливостей використання фітнес-браслетів у медичних інформаційних системах. *Комп'ютерні науки та кібернетика*. 2023. № 3. С. 28–34.
11. Мельник І.С. Локалізація програмних продуктів у сфері охорони здоров'я: проблеми та рішення. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2022. № 1(65). С. 49–53.
12. Петрова Л.І. Соціальні аспекти використання ІТ у профілактиці неінфекційних захворювань. *Соціальна медицина*. 2021. № 2. С. 33–39.

References

1. Ghryghor'jeva I.V. Rolj kharchuvannja u zberezheni zdorov'ja ljudyny. *Suchasna medycyna*. 2020. № 3. S. 45–51.
2. Ghrynevych M.I. Rekomendacijni systemy u cyfrovij medycyni: pidkhody ta vyklyky. *Shtuchnyj intelekt*. 2021. № 2. S. 25–32.
3. Kovaljchuk S.S. Vykorystannja alghorytmiv mashynnogho navchannja dlja pobudovy indyvidualjnykh dijet. *Informacijni tekhnologhiji*. 2022. № 1. S. 10–16.
4. ISO/IEC 27001:2022. Information security, cybersecurity and privacy protection – Information security management systems – Requirements. Official edition.
5. Kravchenko O.V. Nejromerezheva rekomendacijna systema dlja vyboru tovaru na osnovi oghljadiv korystuvachiv i produktiv. *Visnyk NTUU «KPI». Informatyka ta obchysljuvaljna tekhnika*. 2022. № 4. S. 112–119.
6. Varlamov M.D. Rekomendacijna systema z prygotuvannja strav dlja naboru rozpiznanykh ta klasyfikovanykh produktiv kharchuvannja: kvalifikacijna robota. *Kharkiv*, 2021. 74 s.
7. Ghryshhenko S.V. Medychni ta socialjni aspekty racionalnogho kharchuvannja dlja pidtrymky zdorov'ja ukrajinsjkykh pidlitkiv. *Suchasna pediatrija*. 2024. № 1. S. 38–44.
8. Savchuk O.M. Cyfrovi tekhnologhiji u sferi okhorony zdorov'ja: suchasnyj stan ta perspektyvy. *Medychna informatyka*. 2021. № 2. S. 17–22.
9. Demchenko L.V. Rolj osvitnikh program u formuvanni zdorovykh kharchovykh zvyчок sered molodi. *Ghromadsjke zdorov'ja*. 2020. № 1. S. 55–60.
10. Kyryljuk V.M. Analiz mozhlyvostej vykorystannja fitnes-brasletiv u medychnykh informacijnykh

- systemakh. Komp'juterni nauky ta kibernetyka. 2023. № 3. S. 28–34.
11. Meljnyk I.S. Lokalizacija proqramnykh produktiv u sferi okhorony zdorov'ja: problemy ta rishennja. Systemy upravlinnja, navighaciji ta zv'jazku. 2022. № 1(65). S. 49–53.
 12. Petrova L.I. Socialjni aspekty vykorystannja IT u profilaktyci neinfekcijnykh zakhvorjuvanj. Socialjna medycyna. 2021. № 2. S. 33–39.

Rymar P.V., Livakovskiy V.K Development of a nutrition management platform with artificial intelligence integration

In today's conditions of growing interest in a healthy lifestyle, the implementation of digital solutions for effective nutrition management is becoming relevant. A significant part of the population faces difficulties in forming a balanced diet, adhering to a meal regimen and controlling calorie intake. These difficulties are due to both information overload and the lack of personalized tools that would take into account individual needs, the level of physical activity, the user's goals and his eating habits. At the same time, the software market in this area is represented mainly by universal platforms focused on standardized approaches without deep personalization and adaptation to the local user. The article considers the concept of creating a web platform for monitoring and correcting the diet with the integration of artificial intelligence elements. The main goal is to develop a flexible tool for daily monitoring of eating behavior, forming recommendations based on the user's previous experience, analysis of his physiological parameters and preferences. The article analyzes the main problems of modern nutrition, highlights the shortcomings of existing digital solutions, in particular, the lack of adaptation, the complexity of the interface, the limited functionality of

free versions, as well as the risks associated with the transfer of personal data to third parties. Attention is paid to the theoretical foundations of building recommender systems, their classification and principles of operation in the context of eating behavior. Special emphasis is placed on the importance of secure processing of personal data in accordance with the international standard ISO/IEC 27001. The proposed concept aims to form a scientific basis for creating an adaptive, safe and convenient nutrition system that takes into account the needs and characteristics of each individual user. The implementation of such a system can have a significant impact on the formation of long-term healthy habits, the prevention of diseases related to nutrition, and become an effective tool in the field of public health. Its development requires an interdisciplinary approach that combines knowledge from dietetics, information technology, and behavioral sciences.

Keywords: *nutrition, artificial intelligence, recommender system, data security, personalization, health, behavior*

Римар Павло Володимирович – старший викладач кафедри програмного забезпечення Вінницького національного технічного університету, м. Вінниця p.rymar@vntu.edu.ua; старший викладач кафедри інформаційних технологій Донецького національного університету імені Василя Стуса, м. Вінниця, p.rymar@donnu.edu.ua.

Ліваковський Володимир Костянтинович – здобувач вищої освіти Донецького національного університету імені Василя Стуса, м. Вінниця, livakovskiy.v@donnu.edu.ua.

Стаття подана 25.04.2025.

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-290-4-27-40>

УДК 622.2

СТРАТЕГІЧНІ ПІДХОДИ ДО ЗМЕНШЕННЯ РИЗИКІВ РУЙНУВАННЯ БУРИЛЬНИХ КОЛОН НА ОСНОВІ СИСТЕМ ІНЖЕНЕРНОГО МОНІТОРИНГУ

Данилюк Н.Я.

STRATEGIC APPROACHES TO REDUCE THE RISKS OF DRILL STRIKE FAILURE BASED ON ENGINEERING MONITORING SYSTEMS

Danyliuk N.Y.

У сучасній нафтогазовій промисловості питання підвищення довговічності бурильних установок є ключовим для забезпечення ефективності та економічної доцільності видобутку ресурсів. Діяльність у жорстких умовах експлуатації призводить до інтенсивного зношення обладнання, що обумовлює необхідність застосування новітніх технологій для його захисту. Одним із перспективних напрямів у цьому контексті є впровадження BIM-технологій (Building Information Modeling), які сприяють покращенню управління життєвим циклом обладнання, оптимізації процесів технічного обслуговування та прогнозуванню зносу. У статті проведено комплексний аналіз впливу корозійних середовищ на матеріали бурильних установок, визначено основні чинники, що призводять до деградації конструктивних елементів, та розглянуто сучасні методи їх захисту. Зокрема, увага приділена використанню антикорозійних покриттів, модифікованих матеріалів і катодного захисту. Крім того, розглянуто можливості застосування BIM-технологій для моніторингу стану бурильного обладнання в реальному часі, що дозволяє своєчасно виявляти дефекти, мінімізувати ризики аварій та збільшувати експлуатаційний ресурс установок. Дослідження показало, що інтеграція BIM-моделей з методами прогностичної аналітики та системами технічного обслуговування дозволяє значно зменшити витрати на ремонт і простої обладнання. Це, у свою чергу, забезпечує підвищення загальної ефективності нафтогазових підприємств та сприяє їх стійкому розвитку. Автори підкреслюють важливість подальших досліджень у сфері цифрового моделювання для підвищення довговічності бурильних установок та розробки нових стандартів управління технічним станом

обладнання. Результати роботи можуть бути корисними для інженерів, які займаються проектуванням і експлуатацією бурильного обладнання, а також для науковців, що досліджують перспективні методи захисту матеріалів у нафтогазовій галузі. Подальші дослідження у цьому напрямку мають потенціал значно покращити надійність обладнання та знизити операційні витрати, що є критично важливим фактором для енергетичної безпеки та економічної стабільності галузі.

Ключові слова: ризики руйнування; інженерний моніторинг; оптимізація буріння; технології прогнозування; інтернет речей (IoT); безпека бурових операцій.

Вступ. Нафтогазова промисловість висуває високі вимоги до надійності бурильного обладнання, зокрема бурильних колон. Руйнування колон може спричинити серйозні технічні, екологічні та економічні наслідки. Основними причинами пошкоджень є механічні навантаження, корозія, ерозія та втомне руйнування. Інженерний моніторинг відіграє важливу роль у ранньому виявленні дефектів та подовженні строку експлуатації бурильних колон. У сучасних умовах, коли технологічний розвиток відіграє ключову роль у нафтогазовій промисловості, стратегічне впровадження цифрових інструментів моніторингу дозволяє суттєво покращити надійність і безпеку бурових операцій. Впровадження таких підходів дозволяє не лише підвищити ефективність

використання обладнання, а й зменшити витрати на ремонт і заміну пошкоджених колон.

Дане дослідження розглядає стратегічні підходи до зменшення ризиків руйнування шляхом застосування сучасних методів моніторингу та цифрових технологій. Зокрема, акцент робиться на використанні сенсорних технологій, цифрових двійників та методів штучного інтелекту для прогнозування можливих відмов і продовження строку служби бурильних колон.

Мета та завдання статті. Метою дослідження є розробка стратегічних підходів до зниження ризиків руйнування бурильних колон шляхом впровадження сучасних методів інженерного моніторингу та цифрових технологій. Це дозволить забезпечити підвищення надійності бурильного обладнання, мінімізувати аварійні ситуації та покращити ефективність бурових процесів. Для досягнення цієї мети дослідження передбачає комплексний аналіз основних факторів, що спричиняють руйнування бурильних колон, зокрема вплив механічних навантажень, корозії, втомних процесів і геологічних умов. Вивчення традиційних і сучасних методів інженерного моніторингу сприятиме визначенню оптимальних підходів до прогнозування і запобігання відмовам бурильних колон.

У рамках дослідження буде проведено оцінку можливостей цифрових технологій, таких як цифрові двійники, IoT-системи, BIM-моделювання та методи машинного навчання, для створення інтегрованих систем моніторингу. Це дасть змогу вчасно виявляти критичні зміни в технічному стані колон і розробляти ефективні заходи зниження ризиків. Запропоновані стратегічні підходи включатимуть рекомендації щодо використання інноваційних матеріалів, оптимізації режимів буріння та вдосконалення методів контролю стану бурильних колон, що сприятиме підвищенню їхньої довговічності та зниженню експлуатаційних витрат.

Аналіз досліджень і публікацій. Проблематика зниження ризиків руйнування бурильних колон є актуальною в контексті підвищення ефективності та безпеки буріння. У науковій літературі цій темі приділено значну увагу, зокрема через інтеграцію систем інженерного моніторингу.

Дослідження Семенченка А.І. акцентують на формалізації стратегічного планування для забезпечення безпеки технологічних процесів. Автор пропонує комплексний підхід до оцінки

ризиків, який може бути адаптований для моніторингу бурильних колон. Водночас у роботах Внукової Н.М. та співавторів розглядається ризик-орієнтована система, що включає оцінку та контроль ризиків для зниження ймовірності аварій. Ці принципи застосовні до буріння, де своєчасне виявлення дефектів є критичним.

Аналіз причин аварій бурильних труб, представлений у джерелі, підкреслює важливість діагностики матеріальних і технологічних факторів. Дослідження ІФНТУНГ вказують на втому металу та гідравлічні впливи як ключові причини руйнувань. Для їх запобігання пропонується впровадження систем реального часу, що узгоджується з концепцією інженерного моніторингу.

У працях, опублікованих на платформі URAN, наголошується на необхідності інтеграції даних із сенсорів для прогнозування аварій. Це підтверджує доцільність використання IoT-технологій у системах моніторингу. Крім того, дослідження SIPRI акцентують на глобальних ризиках, включаючи технологічні, що підкреслює важливість стратегічного підходу до управління безпекою.

Незважаючи на значний прогрес, у літературі недостатньо уваги приділено адаптації систем моніторингу до специфічних умов буріння, зокрема в екстремальних геологічних середовищах. Це визначає перспективу подальших досліджень, спрямованих на створення гнучких стратегій зниження ризиків.

Виклад основного матеріалу. Основні причини руйнування бурильних колон

Руйнування бурильних колон є однією з найсерйозніших проблем у бурових роботах, оскільки їхня цілісність безпосередньо впливає на ефективність буріння, безпеку персоналу та економічні витрати. Вивчення механізмів і факторів, що спричиняють пошкодження бурильних колон, є критично важливим для розробки стратегічних підходів до їхнього моніторингу та захисту. Основні причини руйнування бурильних колон можна поділити на чотири ключові групи: механічні навантаження, втомні процеси, корозійний вплив і геологічні фактори [1].

Механічні навантаження. Бурильні колони піддаються значним механічним навантаженням під час бурових робіт, що призводить до їх поступового зношування та руйнування. Осьові

та радіальні навантаження створюють напружено-деформований стан, що сприяє утворенню тріщин і втраті міцності матеріалу. Динамічні та ударні навантаження, особливо при бурінні в складних геологічних умовах, є основними чинниками руйнування бурильних колон [2].

Бурильні колони піддаються значним механічним навантаженням під час виконання бурових операцій [3]. До основних видів навантажень належать (табл. 1):

а) осеве навантаження (стиснення та розтягнення) – виникає внаслідок ваги колонни та глибини буріння. Надмірне стиснення може спричинити втрату стійкості труб, тоді як розтягнення призводить до пластичних деформацій і мікротріщин.

б) крутний момент – діє внаслідок обертального руху колони, особливо у жорстких геологічних умовах. При перевищенні критичних значень крутного моменту можливе виникнення скручування або розриву труб.

Таблиця 1

Основні механічні навантаження на бурильні колони [3]

Вид навантаження	Опис	Наслідки
Осьове навантаження (стиснення та розтягнення)	Виникає внаслідок ваги колони та глибини буріння	Пластичні деформації, мікротріщини, втрата стійкості труб
Крутний момент	Вплив обертального руху колони, особливо у складних геологічних умовах	Скручування, розрив труб
Поперечні згинальні навантаження	Виникають через відхилення свердловини та нерівномірний розподіл навантаження	Локальні напруження, прискорене руйнування матеріалу
Динамічні навантаження та ударні хвилі	Виникають при зміні швидкості буріння, бурінні в жорстких породах	Структурне пошкодження, швидке зношування

в) поперечні згинальні навантаження – з'являються через відхилення свердловини та нерівномірний розподіл навантаження. Наявність бокових сил спричиняє локальні напруження, що прискорюють процес руйнування матеріалу.

г) динамічні навантаження та ударні хвилі – виникають при зміні швидкості буріння, роботи в умовах жорстких порід, а також при зустрічі з несподіваними геологічними аномаліями.

Втомні процеси. Циклічні навантаження, які виникають у процесі буріння, викликають накопичення мікрodefектів у матеріалі колон. Це призводить до втомного руйнування, що особливо небезпечно в місцях концентрації напружень, таких як різьбові з'єднання або зони зварних швів. Втомне пошкодження може залишатися непомітним протягом тривалого часу, однак раптовий вихід з ладу бурильної колони може спричинити серйозні аварії [3].

Механічна втома є однією з головних причин поступового руйнування бурильних колон. Під впливом багатократних циклів навантажень матеріал бурильних труб зазнає мікроструктурних змін, що призводять до накопичення пошкоджень та утворення тріщин [4]. Основні механізми втомного руйнування включають (табл. 2):

а) виснаження матеріалу внаслідок багаторазових змін напружень – під час обертання та роботи у викривлених свердловинах відбуваються повторювані цикли навантаження, які значно знижують міцність металу.

б) зосередження напружень у місцях конструктивних дефектів – різьбові з'єднання, зони зварювання та мікрodefекти стають точками ініціації тріщин.

Таблиця 2

Втомні процеси в бурильних колонах [4]

Фактор	Механізм впливу	Наслідки
Багаторазові цикли навантажень	Постійне повторення навантажень у викривлених свердловинах	Виснаження матеріалу, накопичення пошкоджень
Концентрація напружень	Виникає в різьбових з'єднаннях, зонах зварювання	Формування мікротріщин, втомне руйнування
Температурні коливання	Перепади температур через зміну глибини буріння	Термічне розширення, додаткові напруження

в) вплив температурних коливань – унаслідок зміни глибини та умов буріння температура в матеріалі може змінюватися, що сприяє термічному розширенню та додатковим напруженням.

Корозійний вплив. Бурильні колони експлуатуються в агресивних середовищах, де наявність сірководню (H_2S) та інших корозійних агентів спричиняє хімічне та електрохімічне руйнування матеріалу. Корозія значно знижує міцність колон і може спричинити їх передчасне руйнування. Використання антикорозійних покриттів та спеціальних сплавів може частково зменшити цей ризик [3].

Корозія бурильних колон є одним із найнебезпечніших факторів, оскільки вона не тільки послаблює матеріал, але й може викликати катастрофічне руйнування [4]. Основні типи корозійного впливу включають (табл. 3):

а) загальна електрохімічна корозія – виникає через контактування металу з агресивними середовищами (солена вода, кислоти, сірководень). Висока вологість та температура сприяють інтенсифікації процесу.

б) корозійна втома – поєднання корозійного середовища з циклічними навантаженнями прискорює процес тріщиноутворення.

в) сульфідно-стресова корозія (SSC) – особливо небезпечна у зонах, де присутній сірководень (H_2S), що призводить до розриву металу через внутрішні напруження.

Таблиця 3

Корозійний вплив на бурильні колони [4]

Тип корозії	Причини	Наслідки
Загальна електрохімічна корозія	Вплив агресивних середовищ (солена вода, H_2S)	Ослаблення матеріалу, зниження міцності
Корозій-на втома	Поєднання корозії з циклічними навантаженнями	Швидке тріщиноутворення, зниження ресурсу
Сульфідно-стресова корозія (SSC)	Вплив сірководню (H_2S)	Катастрофічне розривання труб
Пітингова корозія	Локальні хімічні атаки на поверхню металу	Утворення глибоких точкових пошкоджень

г) пітингова корозія – локальні ділянки металу зазнають агресивного впливу, утворюючи глибокі ямки, які можуть стати точками початку руйнування.

Геологічні фактори. Геологічні умови буріння також суттєво впливають на стан бурильних колон. Взаємодія з твердими породами спричиняє абразивний знос, а місцеві перегриви, що виникають унаслідок тертя, можуть знижувати міцність матеріалу. Крім того, неоднорідність гірських порід може викликати нерівномірний розподіл навантажень по всій довжині колони.

Фізико-механічні характеристики порід відіграють важливу роль у довговічності бурильних колон [4]. Основні проблеми, пов'язані з геологічними факторами (табл. 4):

а) абразивний знос – твердокристалічні включення (кварц, пірит) спричиняють швидке стирання зовнішньої поверхні труб.

б) диференціальний тиск – значний перепад тиску між стінками свердловини та внутрішнім простором колони може викликати механічну деформацію.

в) геодинамічні процеси – зсуви пластів, землетруси, зміни тектонічної напруженості можуть спричинити непередбачувані напруження в колоні.

Таблиця 4

Вплив геологічних факторів на бурильні колони [4]

Геологічний фактор	Прояв	Наслідки
Абразивний знос	Вплив твердокристалічних включень (кварц, пірит)	Швидке стирання зовнішньої поверхні труб
Диференціальний тиск	Значний перепад тиску між стінками свердловини та внутрішнім простором колони	Механічна деформація, втрата міцності
Геодинамічні процеси	Зсуви пластів, землетруси, зміни напруженості	Непередбачувані напруження в колоні

Аналіз основних причин руйнування бурильних колон свідчить про необхідність комплексного підходу до їхнього захисту [4]. Поєднання сучасних методів інженерного моніторингу, використання високоякісних

матеріалів та впровадження цифрових технологій дозволить значно підвищити довговічність колон, зменшити ризики аварій та оптимізувати експлуатаційні витрати [5].

Методи інженерного моніторингу для оцінки стану бурових колон

Забезпечення надійності бурових колон є одним із ключових завдань у буровій практиці. Для мінімізації ризиків руйнування необхідно здійснювати постійний моніторинг їхнього стану. Ефективний інженерний моніторинг базується на застосуванні як традиційних методів діагностики, так і сучасних цифрових технологій. Комплексний підхід до оцінки стану бурових колон дозволяє не лише своєчасно виявляти дефекти, а й прогнозувати потенційні ризики, що дає змогу значно підвищити безпеку та економічну ефективність бурових операцій [6].

До традиційних методів оцінки стану бурових колон належать візуальний огляд, неруйнівний контроль та аналіз експлуатаційних характеристик (рис. 1).

Візуальний огляд є найпростішим способом діагностики, що здійснюється шляхом перевірки механічних пошкоджень, корозійного зношення та тріщин. Однак цей метод має суттєві обмеження, оскільки не дозволяє виявляти приховані дефекти [8].

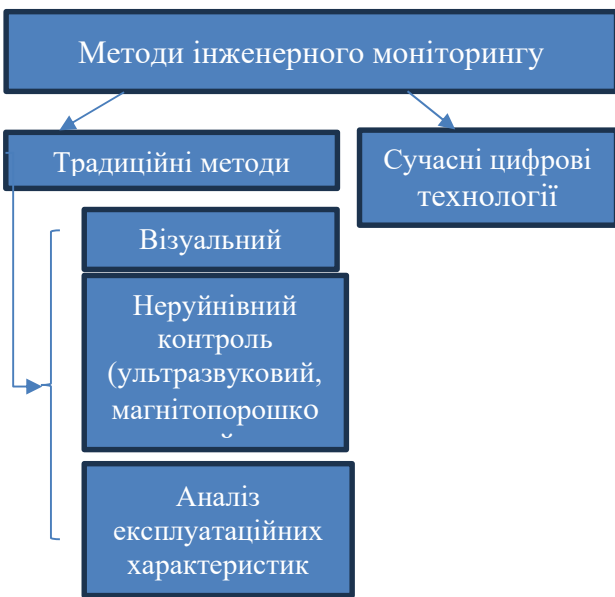


Рис. 1. Загальна схема методів інженерного моніторингу [6], [7]

Неруйнівний контроль (NDT) включає використання ультразвукової дефектоскопії,

магнітопорошкового та рентгенографічного методів (рис. 2).

а) ультразвуковий контроль дозволяє виявляти тріщини, зони корозійного ураження та локальні дефекти матеріалу.

б) магнітопорошковий метод ефективний для виявлення поверхневих та підповерхневих тріщин у феромагнітних матеріалах.

в) рентгенографія дає змогу отримати зображення внутрішньої структури колон, що є особливо важливим для контролю якості зварних з'єднань.

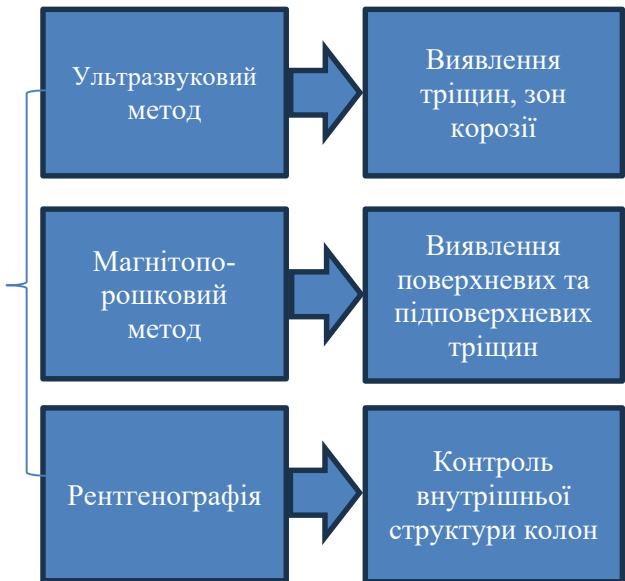


Рис. 2. Схема неруйнівного контролю (NDT) [7]

Аналіз експлуатаційних характеристик включає контроль крутного моменту, осьових навантажень та амплітуди вібрацій під час буріння. Ці показники допомагають оцінити загальний стан конструкції та виявити потенційні ознаки руйнування на ранніх стадіях (рис. 3).

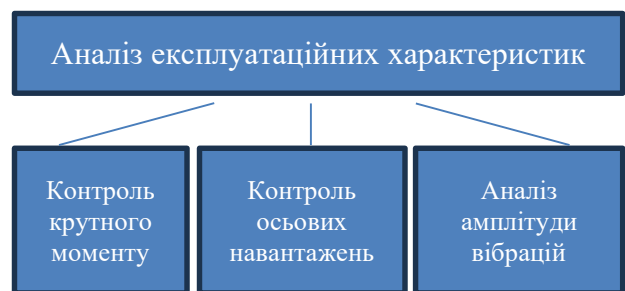


Рис. 3. Аналіз експлуатаційних характеристик [8]

Традиційні методи контролю, хоч і широко застосовуються, мають низку обмежень, пов'язаних із людським фактором, високими затратами часу та недостатньою чутливістю до мікродефектів. У зв'язку з цим сучасні цифрові технології набувають дедалі більшого значення у сфері інженерного моніторингу [8].

Сучасні цифрові технології (BIM, IoT, машинне навчання)

Розвиток цифрових технологій відкриває нові можливості для діагностики та прогнозування стану бурильних колон. Найперспективнішими напрямками є використання інформаційного моделювання будівель (BIM), інтернету речей (IoT) та алгоритмів машинного навчання [9].

BIM-технології у моніторингу бурильних колон

Інформаційне моделювання будівель (BIM) використовується для створення цифрових двійників бурильних колон. Такі моделі містять детальну інформацію про матеріальні характеристики, навантаження, історію експлуатації та можливі дефекти. Використання BIM дозволяє (рис. 4):

- а) візуалізувати напружено-деформований стан колон;
- б) інтегрувати дані з датчиків у режимі реального часу;
- в) моделювати сценарії розвитку пошкоджень та прогнозувати залишковий ресурс конструкцій.

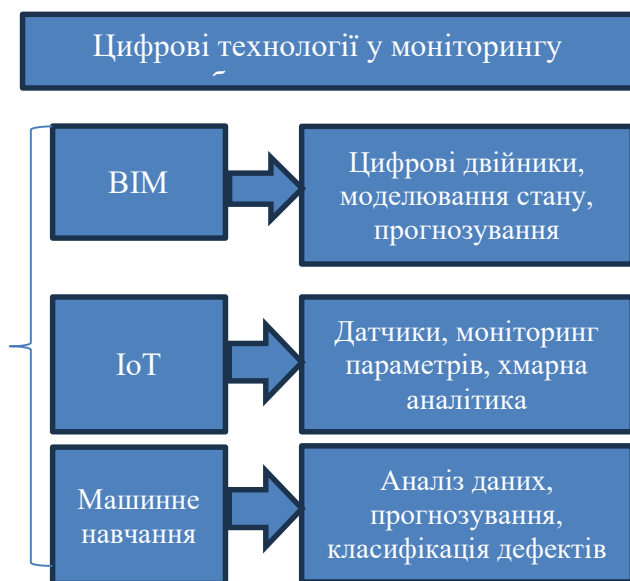


Рис. 4. Загальна схема цифрових технологій у моніторингу бурильних колон [9]

IoT та сенсорні системи

Інтернет речей відіграє важливу роль у сучасному моніторингу бурильних колон. Завдяки інтеграції датчиків, встановлених уздовж конструкції, можна здійснювати постійний контроль ключових параметрів [9]:

- 1) зміни вібраційного стану;
- 2) температурних градієнтів;
- 3) рівня зношення матеріалу;
- 4) параметрів навантаження.

Отримані дані передаються до хмарних серверів, де здійснюється їх обробка та аналіз у реальному часі. Це дозволяє своєчасно виявляти аномалії та оперативно реагувати на загрозу руйнування [9].

Детальніше про ці технології, їх функції та ключові переваги описано у таблиці 5.

Таблиця 5

Функціональні можливості машинних технологій [9]

Технологія	Основні функції	Ключові переваги
BIM	Візуалізація стану, інтеграція даних, прогнозування ресурсу	Детальне моделювання, історія експлуатації, аналіз напружень
IoT	Контроль вібрацій, температури, зношення, навантажень	Постійний моніторинг, миттєва реакція, хмарний аналіз
Машинне навчання	Аналіз закономірностей, класифікація дефектів, прогнозування виходу з ладу	Автоматизація, висока точність, попередження аварій

Алгоритми машинного навчання у прогнозуванні дефектів.

Машинне навчання дозволяє автоматизувати аналіз великих масивів даних, отриманих у процесі експлуатації бурильних колон [10]. Алгоритми на основі нейронних мереж та методів глибокого навчання здатні [11]:

- 1) розпізнавати закономірності у поведінці конструкцій під навантаженням [12];
- 2) класифікувати дефекти за рівнем небезпеки [12];

3) прогнозувати час до повного виходу з ладу колон [12].

Застосування цифрових технологій значно підвищує точність моніторингу та забезпечує можливість проактивного управління технічним станом бурильного обладнання [13].

Комплексні системи моніторингу

Комбінація традиційних методів контролю та сучасних цифрових технологій формує основу комплексних систем моніторингу бурильних колон [14]. Такі системи мають низку переваг (табл. 6):

а) поєднання фізичних і цифрових методів діагностики, що дозволяє отримувати максимально повну картину стану колон.

б) використання великих даних та штучного інтелекту для оперативного аналізу й прийняття рішень.

в) можливість дистанційного моніторингу, що забезпечує контроль у реальному часі без необхідності проведення дороговартісних перевірок на місці.

Таблиця 6

Порівняння традиційних та цифрових методів моніторингу [14]

Метод моніторингу	Опис	Переваги	Недоліки
Традиційні методи (візуальний контроль, ультразвукова діагностика, механічні вимірювання)	Використання перевірених фізичних методів для оцінки стану колон	Висока точність локальних вимірювань, доступність	Вимагає ручного проведення перевірок, не забезпечує постійного моніторингу
Цифрові технології (ВІМ, IoT, машинне навчання)	Інтеграція датчиків, цифрових двійників та аналітики великих даних	Автоматизований моніторинг у реальному часі, прогнозування дефектів	Висока початкова вартість впровадження
Комплексні системи (поєднання традиційних і цифрових підходів)	Аналіз у реальному часі на основі історичних та сенсорних даних	Найбільш повна картина стану колон, можливість дистанційного моніторингу	Необхідність адаптації до конкретних умов експлуатації

Однією з перспективних моделей комплексного моніторингу є система цифрового двійника бурильної колони, що об'єднує дані з датчиків, результати комп'ютерного моделювання та історичні дані експлуатації.

Такий підхід дозволяє не лише оцінювати поточний стан обладнання, але й прогнозувати можливі сценарії розвитку дефектів, що дає змогу запобігати аварійним ситуаціям [15].

Таким чином, розвиток методів інженерного моніторингу бурильних колон забезпечує підвищення ефективності бурових робіт, зниження витрат на технічне обслуговування та мінімізацію ризиків руйнування обладнання. Впровадження сучасних цифрових технологій у поєднанні з традиційними методами контролю є ключовим напрямом підвищення безпеки та довговічності бурильних колон у сучасній нафтогазовій промисловості [16].

Стратегічні підходи до зменшення ризиків

Забезпечення довговічності бурильних колон є одним із ключових аспектів безпечного та ефективного проведення бурових робіт. Високі механічні навантаження, агресивне середовище та складні технологічні умови експлуатації створюють значні ризики передчасного виходу з ладу бурового обладнання. Для мінімізації цих ризиків застосовуються комплексні стратегічні підходи, що поєднують методи проактивного моніторингу, використання інноваційних матеріалів, оптимізацію режимів буріння та впровадження цифрових технологій [17].

Проактивний моніторинг. Традиційні підходи до контролю технічного стану бурильних колон здебільшого зводяться до періодичних перевірок та діагностичних заходів після виявлення дефектів. Однак такий підхід не завжди дозволяє своєчасно реагувати на початкові стадії деградації матеріалу. Проактивний моніторинг передбачає безперервний контроль критичних параметрів бурильних колон у режимі реального часу, що дозволяє не лише виявляти наявні дефекти, а й прогнозувати їх розвиток [18].

Сучасні сенсорні системи забезпечують контроль напружено-деформованого стану колон шляхом аналізу наступних параметрів [19]:

- а) рівня осевих і крутних навантажень;
- б) амплітуди та частоти вібрацій;
- в) змін у геометрії колони під впливом навантажень;

г) локальної температури та корозійної активності.

Детальніше про аналіз параметрів напружено-деформованого стану колон наведено в таблиці 7.

Таблиця 7

Основні параметри моніторингу бурильних колон [18]

Параметр	Опис	Метод контролю
Осьові та крутні навантаження	Визначають рівень механічного впливу на колону	Сенсорні системи, тензодатчики
Вібрації (амплітуда, частота)	Контроль резонансних коливань, що сприяють руйнуванню	Акселерометри, датчики вібрацій
Зміни у геометрії	Деформації під впливом навантажень	Лазерні сканери, оптичні датчики
Локальна температура	Вплив перегріву на матеріал	Тепловізори, термомпари
Корозійна активність	Оцінка рівня корозії	Електрохімічні сенсори, аналіз хімічного складу

Використання бездротових сенсорів та технологій інтернету речей (IoT) дозволяє інтегрувати дані моніторингу у хмарні платформи для автоматизованого аналізу та побудови прогнозних моделей. Зокрема, застосування методів штучного інтелекту та машинного навчання забезпечує оцінку залишкового ресурсу колон на основі багатofакторного аналізу експлуатаційних умов.

Впровадження інноваційних матеріалів. Матеріал бурильної колони визначає її довговічність та стійкість до впливу агресивних факторів. Одним із найбільш перспективних напрямів підвищення ресурсу колон є використання високоміцних сплавів, що володіють підвищеною міцністю та стійкістю до корозійного та механічного зношування [19].

Серед інноваційних матеріалів, що знаходять застосування у бурових системах, можна виділити [18]:

а) високоміцні маловуглецеві сталі, модифіковані елементами, що підвищують їхню корозійну та втомну стійкість (Cr, Mo, Ni, V).

б) композитні покриття, що формують додатковий бар'єр від корозії та механічного зношування (нанокерамічні, карбідні, алюмінієві).

в) біметалеві конструкції, що поєднують міцність сталевого осердя з корозійною стійкістю зовнішнього шару.

г) наноструктуровані сплави, що демонструють підвищену зносостійкість завдяки унікальній мікроструктурі.

Інноваційні матеріали, що знаходять застосування у бурових системах, а також їх переваги та недоліки наведені у таблиці 8, а демонстрація збільшення довговічності бурильних колон при застосування цих інноваційних матеріалів наведена на рисунку 5.

Таблиця 8

Порівняння традиційних та інноваційних матеріалів для бурильних колон [18]

Матеріал	Переваги	Недоліки
Високоміцні маловуглецеві сталі	Висока механічна міцність, стійкість до втоми	Потребує додаткового захисту від корозії
Композитні покриття	Захист від корозії та зношування, легка вага	Висока вартість нанесення
Біметалеві конструкції	Поєднання міцності сталі та стійкості до корозії	Складність виробництва
Наноструктуровані сплави	Покращена зносостійкість, висока довговічність	Висока собівартість, обмежене застосування

Використання інноваційних матеріалів дає змогу збільшити ресурс бурильних колон на 30-50%, що значно скорочує експлуатаційні витрати та ризики аварійних ситуацій [19].

Оптимізація режимів буріння. Режими буріння відіграють ключову роль у зменшенні ризику механічного пошкодження бурильних колон. Основними факторами, що впливають на процес зношування та руйнування колон, є [18]:

а) величина осьового навантаження, що визначає рівень контактного напруження між колоною та стінками свердловини.

б) швидкість обертання, що впливає на динамічні навантаження та рівень вібрацій.

в) гідравлічний режим, що визначає ефективність видалення шламу та рівень ерозійного впливу бурового розчину.

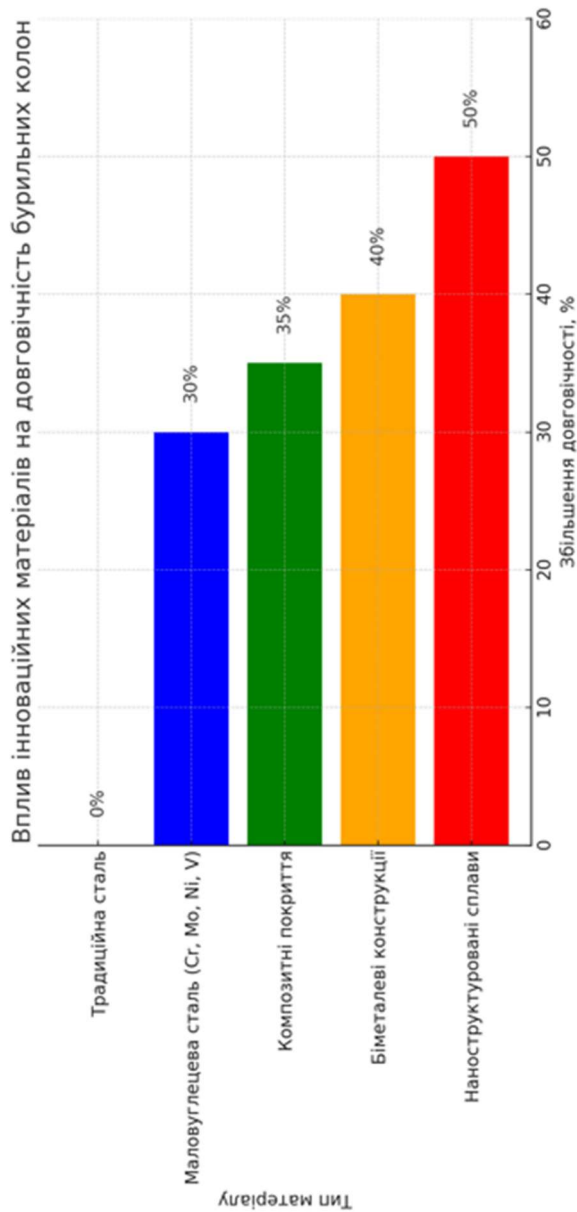


Рис. 5. Графік, який демонструє збільшення довговічності бурильних колон при застосуванні інноваційних матеріалів (з даного графіка можна помітити, що найкращий ефект дають наноструктуровані сплави, які можуть підвищити ресурс колон до 50%) [18]

Для зниження ризику руйнування колон застосовується адаптивне регулювання навантажень, що базується на аналізі поточних умов буріння [19]. Зокрема, використання автоматизованих систем контролю режимів дозволяє (табл. 9):

а) підтримувати оптимальне співвідношення швидкості обертання та осевого навантаження для мінімізації втомних пошкоджень;

б) динамічно змінювати гідравлічний режим для запобігання ерозійному зношуванню;

в) здійснювати оперативний контроль вібрацій, що дозволяє запобігти утворенню резонансних коливань у колоні.

Таблиця 9

Фактори, що впливають на зношування бурильних колон та методи оптимізації режимів буріння [19]

Фактор	Вплив на колону	Метод оптимізації
Осьове навантаження	Викликає контактне напруження	Адаптивне регулювання навантажень
Швидкість обертання	Викликає динамічні навантаження та вібрації	Контроль оптимальної швидкості
Гідравлічний режим	Впливає на ерозію та ефективність видалення шламу	Динамічне коригування параметрів

Застосування цифрових моделей буріння дозволяє прогнозувати ефекти зміни параметрів у режимі реального часу та оперативно коригувати стратегію буріння для мінімізації навантажень на бурильні колони.

Використання BIM-технологій. Застосування технології інформаційного моделювання будівель (BIM) дозволяє інтегрувати всі дані про бурильні колони у єдину цифрову платформу, що забезпечує комплексний аналіз їхнього стану на всіх етапах життєвого циклу [9].

Основними перевагами використання BIM у процесі експлуатації бурильних колон є (табл. 10):

а) створення цифрових двійників, що відображають напружено-деформований стан колон у режимі реального часу [15,16].

б) моделювання сценаріїв деградації матеріалу, що дозволяє прогнозувати розвиток дефектів на основі історичних даних та експлуатаційних умов.

в) оптимізація технічного обслуговування, що дозволяє мінімізувати витрати на ремонти та запобігати аварійним відмовам.

г) інтеграція з іншими цифровими системами (IoT, штучний інтелект, великі дані), що дозволяє автоматизувати процес прийняття рішень щодо технічного стану колон.

Додатково на рисунку 6 продемонстровано порівняння ефективності традиційного управління ризиками та за допомогою BIM-методики.

Таблиця 10

Використання BIM-технологій у моніторингу бурових колон [9]

Функція BIM	Опис	Переваги
Цифрові двійники	Відображення стану колон у реальному часі	Прогнозування пошкоджень
Моделювання деградації	Аналіз історичних даних для прогнозування дефектів	Зниження аварійних ризиків
Оптимізація обслуговування	Автоматизований аналіз стану колон	Мінімізація витрат
Інтеграція з IoT та AI	Автоматичний контроль стану колон	Підвищення ефективності прийняття рішень

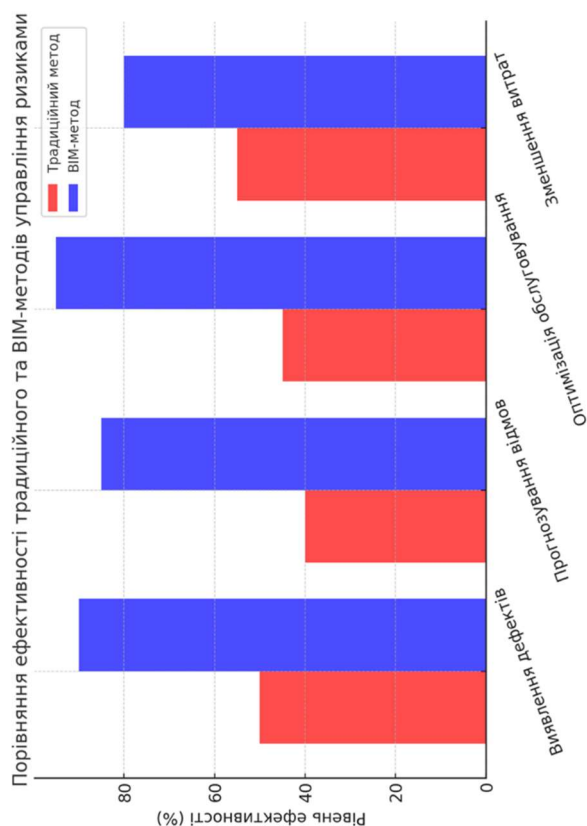


Рис. 6. Графік ефективності традиційного управління ризиками та за допомогою BIM-методики [9]

Застосування BIM-технологій у буровій галузі дозволяє значно підвищити ефективність управління ризиками та забезпечити максимальну надійність бурових колон у складних умовах експлуатації [9].

Комплексний підхід до зниження ризиків виходу з ладу бурових колон базується на впровадженні проактивного моніторингу, використанні інноваційних матеріалів, оптимізації режимів буріння та застосуванні BIM-технологій. Поєднання цих методів дозволяє значно збільшити термін служби колон, підвищити безпеку бурових робіт та зменшити експлуатаційні витрати. Подальший розвиток цифрових технологій, зокрема алгоритмів штучного інтелекту та предиктивної аналітики, відкриває нові можливості для удосконалення систем моніторингу та управління технічним станом бурового обладнання.

Практичні рекомендації для нафтогазової галузі

Ефективне впровадження технологій моніторингу є критично важливим для забезпечення довговічності бурових колон, особливо в умовах інтенсивної експлуатації у глибоких свердловинах з високим тиском і температурою. Одним із перспективних напрямків є використання вбудованих сенсорів та оптоволоконних систем, які дозволяють у режимі реального часу отримувати дані про напружено-деформований стан колон. Зокрема, технологія Distributed Acoustic Sensing (DAS), яка вже успішно використовується на деяких нафтових родовищах у Північному морі, забезпечує безперервний контроль за динамічними навантаженнями, температурними змінами та корозійною активністю вздовж усієї довжини бурової колони. Впровадження таких систем дозволяє оперативно реагувати на критичні зміни, зменшуючи ризик раптових відмов обладнання [20].

Додатково, використання штучного інтелекту та машинного навчання у поєднанні з великими масивами даних, отриманих від IoT-систем, відкриває нові можливості для прогнозного аналізу стану колон. Наприклад, компанія Schlumberger впроваджує алгоритми глибокого навчання для ідентифікації патернів втомного руйнування, що дає змогу передбачати потенційні дефекти за кілька тисяч годин до їхнього критичного розвитку. Подібний підхід забезпечує значне підвищення безпеки бурових операцій і мінімізацію непродуктивного часу,

який може коштувати компаніям сотні тисяч доларів на добу [21].

Оптимізація технічного обслуговування має ґрунтуватися на концепції *condition-based maintenance* (CBM), що передбачає проведення ремонтних і профілактичних заходів лише за необхідності, а не за жорстко регламентованим графіком [22]. Такий підхід уже демонструє високу ефективність у видобувних компаніях Норвегії та Канади, де впровадження CBM дозволило зменшити кількість аварійних відмов бурильних колон на 35%, а витрати на ремонт – на 25%. Крім того, використання сучасних покриттів, таких як карбід-вольфрамові або керамічні наноструктуровані композити, дозволяє зменшити вплив абразивного зношування та агресивних хімічних середовищ, що є особливо важливим для глибоководного буріння в регіонах, таких як Мексиканська затока чи Західна Африка [23].

Одним із ключових аспектів економічної ефективності впровадження запропонованих заходів є застосування BIM-технологій для комплексного управління життєвим циклом бурильних колон. Створення цифрових двійників дозволяє не лише проводити моделювання експлуатаційних навантажень, а й оцінювати довгостроковий економічний ефект від впровадження нових матеріалів чи технологій моніторингу [24]. Наприклад, у рамках спільного проекту компаній ExxonMobil та Halliburton було доведено, що використання BIM-моделювання для оптимізації конструкції бурильних труб дозволило скоротити середню тривалість буріння свердловини на 8%, що еквівалентно економії понад 3 мільйони доларів на кожній свердловині [25].

Враховуючи зростаючі виклики у сфері нафтогазового буріння, застосування цифрових технологій, адаптивних стратегій технічного обслуговування та новітніх матеріалів є ключовими факторами для підвищення надійності бурильних колон. Подальші дослідження у цій сфері мають бути спрямовані на розробку інтегрованих рішень, що поєднують аналітику великих даних, передові матеріали та автоматизовані системи моніторингу для створення максимально ефективних і безпечних бурових процесів [20].

Висновок. Результати проведеного дослідження підтверджують, що інтеграція сучасних методів інженерного моніторингу, цифрових технологій та стратегічних підходів до оптимізації експлуатаційних параметрів бурильних колон є ключовим напрямком для

підвищення їхньої надійності. Впровадження інтелектуальних сенсорних систем у поєднанні з аналізом великих даних дозволяє своєчасно ідентифікувати критичні напруження та прогнозувати залишковий ресурс колон, що суттєво знижує ймовірність їх аварійного руйнування.

Застосування високоміцних сплавів та адаптивних композитних покриттів демонструє значний потенціал у зменшенні негативного впливу корозійно-абразивного зношування, що є особливо актуальним для складних гірничо-геологічних умов. Оптимізація режимів буріння з урахуванням реальних експлуатаційних навантажень та цифрового моделювання дозволяє підвищити ефективність роботи колон, мінімізуючи ризики механічного пошкодження.

Розвиток і впровадження BIM-моделювання у нафтогазовій галузі відкриває нові перспективи для комплексного аналізу життєвого циклу бурильних труб. Використання цифрових двійників не лише забезпечує точніший контроль за технічним станом колон, а й сприяє формуванню стратегій управління ресурсами на основі економічно обґрунтованих прогнозів. Це дає змогу зменшити непродуктивні витрати та підвищити рентабельність бурових операцій.

Таким чином, результати цього дослідження можуть бути використані для розробки нових стандартів експлуатації бурильних колон, що дозволить суттєво підвищити їхню довговічність, зменшити витрати на технічне обслуговування та підвищити рівень безпеки нафтогазових проєктів. Подальші дослідження в цій сфері мають бути спрямовані на розширення можливостей штучного інтелекту та машинного навчання для більш точного прогнозування деградації матеріалів, а також на тестування інноваційних матеріалів у реальних експлуатаційних умовах.

Л і т е р а т у р а

1. Івасів В. М., Гриджук Я. С., Юрич Л. І. Analysis of destruction causes of drill string elements // Technology audit and production reserves. 2014. № 6. С. 15. DOI: 10.15587/2312-8372.2014.31838.
2. Витязь О. Ю., Грабовський Р. С., Тирлич В. В., Артим В. І. Оцінка впливу динамічних навантажень на умови руйнування труб бурильних колон під час спуско-підймальних операцій // Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу. 2018. С. 38–47.

3. Артим В. І. Оцінка пошкоджуючої дії асиметричного навантаження на елементи бурильних і штангових колон // *Нафтогазова енергетика*. 2009. № 4. С. 26–32.
4. Крижанівський Є. І. Вплив асиметрії циклу на опір корозійної втоми з'єднань бурильних труб // *Фізико-хімічна механіка матеріалів*. 1990. Т. 26, № 4. С. 87–89.
5. Джус А. П., Лисканич М. В. Вплив асиметрії навантаження на характеристики втомного руйнування елементів бурильної колони // *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2010. № 2. С. 54–58.
6. Кийко Л. М. Методи та засоби контролю різьбових з'єднань трубних колон : дис. ... д-ра техн. наук : 05.05.12. Івано-Франківськ, 2002. URL: <https://uacademic.info/ua/document/0402U000952> (дата звернення: 18.09.2024).
7. Івасів В. М. Методи та засоби управління бурильною колоною для забезпечення її надійності : дис. ... д-ра техн. наук : 05.05.12. Івано-Франківськ, 1999. URL: <https://uacademic.info/ua/document/0599U000334> (дата звернення: 21.08.2024).
8. Рачкевич Р. В. Розвиток наукових основ забезпечення працездатності колон бурильних і насосно-компресорних труб : дис. ... д-ра техн. наук : 05.15.10. Івано-Франківськ, 2018. URL: <https://uacademic.info/ua/document/0518U000405> (дата звернення: 18.09.2024).
9. Данилюк Н. Я., Артим В. І. Огляд методів і засобів інформаційної підтримки життєвого циклу бурильних установок на основі BIM-технології // *Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу*. 2024. № 1(56). С. 34–48. URL: [https://doi.org/10.31471/1993-9965-2024-1\(56\)-34-48](https://doi.org/10.31471/1993-9965-2024-1(56)-34-48) (дата звернення: 18.09.2024).
10. Рачкевич Р. В., Слободян В. І., Івасів В. М., Артим В. І. Довговічність трубних колон за складного напружено-деформованого стану // *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2016. № 4. С. 25–33. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/rnng_2016_4_4 (дата звернення: 21.08.2024).
11. Гриджук Я. С. Прогнозування довговічності елементів бурильної колони при вібраційному навантаженні : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.05.12 / Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу. Івано-Франківськ, 2013. 20 с.
12. Данилюк Я. М. Прогнозування довговічності бурильних колон з використанням засобів геометричного контролю труб // *Методи та прилади контролю якості*. 2002. № 8. С. 6–10.
13. Рачкевич І. О. Прогнозування втомної довговічності елементів бурильної колони на основі машинного навчання // *Український науковий журнал*. 2021. URL: <https://uacademic.info/ua/document/0821U102160> (дата звернення: 18.09.2024).
14. Демків І. В., Ковальчук О. А. Аналіз концепції цифрових двійників: історія розвитку та сучасне застосування // *Електронний архів ТНТУ*. 2022. С. 179–180.
15. Industrial Internet Consortium. Цифрові двійники для промислового застосування. АТЕР КРІ, 2020 (дата звернення: 18.09.2024).
16. Цифрові двійники: що це за технологія і як вона допоможе відновити Україну. PSM7.com, 2023 (дата звернення: 18.09.2024).
17. Витязь О. Ю. Розвиток наукових основ оцінки роботоздатності колон бурильних та гнучких труб : дис. ... д-ра техн. наук : 05.15.10. Івано-Франківськ : Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, 2021. 350 с.
18. Рачкевич Р. В. Розвиток наукових основ забезпечення працездатності колон бурильних і насосно-компресорних труб на ділянках похило-скерованих і горизонтальних свердловин із урахуванням просторової жорсткості : дис. канд. техн. наук : 05.15.10. Івано-Франківськ : Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, 2016. 200 с.
19. Чернов Б. О., Сімків М. Є., Чернов В. Б. Методи підвищення довговічності елементів бурильної колони // *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2008. № 4(29).
20. Markom A. M., Saharudin S., Hisham M. H. Systematic Review of Fiber-Optic Distributed Acoustic Sensing: Advancements, Applications, and Challenges // *SSRN*. 2025 (дата звернення: 18.09.2024).
21. Wang B., Zhan Z., Cheng M. Distributed acoustic sensing technology in marine geosciences // *Geodesy and Geodynamics*. 2024. Vol. 15, No. 5. P. 345–359.
22. Витязь О. Ю. Прогнозування довговічності бурильних колон з використанням засобів неруйнівного контролю // *Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу*. 2023. № 2. С. 45–52.
23. Li H., Bao X. Optical Fiber Distributed Acoustic Sensors: A Review // *IEEE Sensors Journal*. 2021. Vol. 21, No. 11. P. 12792–12803.
24. Zhang Y., Wang D. Distributed Acoustic Sensing With Sensitivity-Enhanced Optical Cable // *IEEE Photonics Technology Letters*. 2020. Vol. 32, No. 24. P. 1525–1528.
25. Витязь О. Ю. Вплив експлуатаційних дефектів на роботоздатність бурильних колон // *Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу*. 2023. № 3. С. 33–40.

References

1. Ivasiv V. M., Grydzhuk Ya. S., Yurych L. I. Analysis of destruction causes of drill string elements // *Technology audit and production reserves*. 2014. № 6. P. 15. DOI: 10.15587/2312-8372.2014.31838.
2. Vityaz O. Yu., Hrabovskyi R. S., Tyrlych V. V., Artym V. I. Otsinka vplyvu dynamichnykh navantazhen na umovy ruynuvannya trub burylnykh kolon pid chas spusko-pidiimalnykh operatsii // *Naukovyi visnyk Ivano-Frankivskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu nafty i hazu*. 2018. P. 38–47.
3. Artym V. I. Otsinka poshkodzhuvanoi dii asymetrychnoho navantazhennia na elementy burylnykh i shtanhovykh kolon // *Naftogazova energetyka*. 2009. № 4. P. 26–32.
4. Kryzhanivskiy Ye. I. Vplyv asymetrii tsykladu na opir koroziiinoi vtomly z'iednan burylnykh trub // *Fizyko-khimichna mekhanika materialiv*. 1990. T. 26, № 4. P. 87–89.
5. Dzhus A. P., Lyskanych M. V. Vplyv asymetrii navantazhennia na kharakterystyky vtomnoho ruynuvannya elementiv burylnoi kolony // *Rozvidka ta rozrobka naftovykh i gazovykh rodovyshch*. 2010. № 2. P. 54–58.
6. Kiyko L. M. Metody ta zasoby kontroliu rizbovykh z'iednan trubnykh kolon : dys. ... d-ra tekhn. nauk : 05.05.12. Ivano-Frankivsk, 2002. URL: <https://uacademic.info/ua/document/0402U000952> (data zvernennia: 18.09.2024).
7. Ivasiv V. M. Metody ta zasoby upravlinnia burylnoiu koloniou dlia zabezpechennia yii nadiinosti : dys. ... d-ra tekhn. nauk : 05.05.12. Ivano-Frankivsk, 1999. URL: <https://uacademic.info/ua/document/0599U000334> (data zvernennia: 21.08.2024).
8. Rachkevych R. V. Rozvytok naukovykh osnov zabezpechennia pratsezdatsnosti kolon burylnykh i nasosno-kompresornykh trub : dys. ... d-ra tekhn. nauk : 05.15.10. Ivano-Frankivsk, 2018. URL: <https://uacademic.info/ua/document/0518U000405> (data zvernennia: 18.09.2024).
9. Danyliuk N. Ya., Artym V. I. Ohliad metodiv i zasobiv informatsiinoi pidtrymky zhyttievoho tsykladu burylnykh ustanovok na osnovi BIM-tekhnologii // *Naukovyi visnyk Ivano-Frankivskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu nafty i hazu*. 2024. № 1(56). P. 34–48. URL: [https://doi.org/10.31471/1993-9965-2024-1\(56\)-34-48](https://doi.org/10.31471/1993-9965-2024-1(56)-34-48) (data zvernennia: 18.09.2024).
10. Rachkevych R. V., Slobodian V. I., Ivasiv V. M., Artym V. I. Dovhovichnist trubnykh kolon za skladnoho napruzhenno-deformovanoho stanu // *Rozvidka ta rozrobka naftovykh i gazovykh rodovyshch*. 2016. № 4. P. 25–33. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/rnng_2016_4_4 (data zvernennia: 21.08.2024).
11. Grydzhuk Ya. S. Prohnozuvannia dovhovichnosti elementiv burylnoi kolony pry vibratsiinomu navantazhenni : avtoref. dys. ... kand. tekhn. nauk : 05.05.12 / Ivano-Frankivskiy natsionalnyi tekhnichnyi universytet nafty i hazu. Ivano-Frankivsk, 2013. 20 p.
12. Danyliuk Ya. M. Prohnozuvannia dovhovichnosti burylnykh kolon z vykorystanniam zasobiv heometrychnoho kontroliu trub // *Metody ta pryklady kontroliu yakosti*. 2002. № 8. P. 6–10.
13. Rachkevych I. O. Prohnozuvannia vtomnoi dovhovichnosti elementiv burylnoi kolony na osnovi mashynnoho navchannia // *Ukrainskyi naukovyi zhurnal*. 2021. URL: <https://uacademic.info/ua/document/0821U102160> (data zvernennia: 18.09.2024).
14. Demkiv I. V., Kovalchuk O. A. Analiz kontseptsii tsyfrovyykh dvinykiv: istoriia rozvytku ta suchasne zastosuvannia // *Elektronnyi arkhiv TNTU*. 2022. P. 179–180.
15. Industrial Internet Consortium. Digital twins for industrial applications. ATEP KPI, 2020 (access date: 18.09.2024).
16. Tsyfrovi dvinyky: shcho tse za tekhnolohiia i yak vona dopomozhe vidnovyty Ukrainu. PSM7.com, 2023 (access date: 18.09.2024).
17. Vityaz O. Yu. Rozvytok naukovykh osnov otsinky robotodatnosti kolon burylnykh ta hnutkykh trub : dys. ... d-ra tekhn. nauk : 05.15.10. Ivano-Frankivsk : Ivano-Frankivskiy natsionalnyi tekhnichnyi universytet nafty i hazu, 2021. 350 p.
18. Rachkevych R. V. Rozvytok naukovykh osnov zabezpechennia pratsezdatsnosti kolon burylnykh i nasosno-kompresornykh trub na diliankakh pokhylo-skerovanykh i horyzontalnykh sverdlovyn iz urakhuvanniam prostoroivoi zhorstkosti : dys. kand. tekhn. nauk : 05.15.10. Ivano-Frankivsk : Ivano-Frankivskiy natsionalnyi tekhnichnyi universytet nafty i hazu, 2016. 200 p.
19. Chernov B. O., Simkiv M. Ye., Chernov V. B. Metody pidvyshchennia dovhovichnosti elementiv burylnoi kolony // *Rozvidka ta rozrobka naftovykh i gazovykh rodovyshch*. 2008. № 4(29).
20. Markom A. M., Saharudin S., Hisham M. H. Systematic Review of Fiber-Optic Distributed Acoustic Sensing: Advancements, Applications, and Challenges // *SSRN*. 2025 (access date: 18.09.2024).
21. Wang B., Zhan Z., Cheng M. Distributed acoustic sensing technology in marine geosciences // *Geodesy and Geodynamics*. 2024. Vol. 15, No. 5. P. 345–359.
22. Vityaz O. Yu. Prohnozuvannia dovhovichnosti burylnykh kolon z vykorystanniam zasobiv neruynivnoho kontroliu // *Naukovyi visnyk Ivano-Frankivskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu nafty i hazu*. 2023. № 2. P. 45–52.
23. Li H., Bao X. Optical Fiber Distributed Acoustic Sensors: A Review // *IEEE Sensors Journal*. 2021. Vol. 21, No. 11. P. 12792–12803.
24. Zhang Y., Wang D. Distributed Acoustic Sensing With Sensitivity-Enhanced Optical Cable // *IEEE*

Photonics Technology Letters. 2020. Vol. 32, No. 24. P. 1525–1528.

25. Vityaz O. Yu. Vplyv ekspluatatsiinykh defektiv na robotodatnist burylnykh kolon // Naukovyi visnyk Ivano-Frankivskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu nafty i hazu. 2023. № 3. P. 33–40.

Danyliuk N.Y. Strategic approaches to reduce the risks of drilling strike failure based on engineering monitoring systems

In the modern oil and gas industry, the issue of increasing the durability of drilling rigs is key to ensuring the efficiency and economic feasibility of resource extraction. Activities in harsh operating conditions lead to intensive wear of equipment, which necessitates the use of the latest technologies for its protection. One of the promising areas in this context is the implementation of BIM technologies (Building Information Modeling), which contribute to improving equipment life cycle management, optimizing maintenance processes and predicting wear. The article provides a comprehensive analysis of the impact of corrosive environments on drilling rig materials, identifies the main factors leading to the degradation of structural elements, and considers modern methods of their protection. In particular, attention is paid to the use of anti-corrosion coatings, modified materials and cathodic protection. In addition, the possibilities of using BIM technologies for monitoring the condition of drilling equipment in real time are considered, which allows for timely detection of defects, minimizing the risks of accidents and increasing the operational life of the units.

The study showed that the integration of BIM models with predictive analytics and maintenance systems allows to significantly reduce the costs of repairs and downtime of equipment. This, in turn, ensures an increase in the overall efficiency of oil and gas enterprises and contributes to their sustainable development. The authors emphasize the importance of further research in the field of digital modeling to increase the durability of drilling rigs and develop new standards for managing the technical condition of equipment. The results of the work can be useful for engineers involved in the design and operation of drilling equipment, as well as for scientists investigating promising methods of material protection in the oil and gas industry. Further research in this area has the potential to significantly improve the reliability of equipment and reduce operating costs, which is a critically important factor for energy security and economic stability of the industry.

Keywords: failure risks; engineering monitoring; drilling optimization; forecasting technologies; Internet of Things (IoT); drilling safety.

Данилюк Назарій Ярославович – аспірант кафедри нафтогазового обладнання, спеціальності галузевого машинобудування, Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу, м.Івано-Франківськ, d.nazariy97@gmail.com.

Стаття подана 18.04.2025.

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-290-4-41-47>

УДК 662.2

ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ЕЛЕМЕНТІВ УНІВЕРСАЛЬНОГО ПРЕВЕНТОРА

Шостаківський І.І., Мосора Ю.Р., Лях М.М.,
Врюкало В.В., Михайлюк В.В., Борушчак Л.О.

STUDY OF THE STRESS-STRAIN STATE OF THE ELEMENTS OF THE ANNULAR PREVENTOR

Shostakivskiy I.I., Mosora Y.R., Liakh M.M.,
Vriukalo V.V., Mykhailiuk V.V., Borushchak L.O.

Розглядається роль та конструктивні особливості противикидного обладнання, зокрема універсального превентора, який використовується під час буріння нафтових і газових свердловин. Обсадна колона із бурильною колоною розділяє свердловинний стовбур, а кільцевий зазор між ними заповнюється буровим розчином, що створює гідростатичний тиск для контролю виходу пластових рідин. Універсальний превентор забезпечує герметизацію кільцевого простору, дозволяючи одночасно повертати та протягувати бурильні труби, що підвищує безпеку та ефективність процесу буріння. У роботі також наведено інформацію, що стосується аналізу закордонних та вітчизняних досліджень і публікацій за тематикою дослідження. Основним робочим елементом в конструкції універсального превентора є кільцевий гумовий ущільнювач, який піддається дії циклічних навантажень і втомному руйнуванню внаслідок проходження крізь нього бурильної колони. Водночас корпус та поршень превентора піддаються дії високого тиску, що призводить до виникнення та концентрації у певних ділянках значних напружень. З метою визначення величин та ділянок концентрації напружень побудовано тривимірну модель універсального превентора. Для дослідження використано тільки два його елементи: корпус та поршень. Величини тисків, які застосовувались під час дослідження становили: 14 та 70 МПа. При дослідженні було враховано величину зазору між корпусом та поршнем. Встановлено, що за малих величин зазорів між поршнем та корпусом за прийнятих граничних умов відбувається їх взаємодія, у результаті чого спостерігається поява контактного тиску. Максимальна величин цього тиску складає 320 МПа при величині зазору між робочими поверхнями

корпусу та поршня 0,1 мм. За величини зазору 0,4 мм та аналогічних граничних умов контактний тиск не спостерігається. Подальше збільшення величини зазору може призвести до швидкого виходу ущільнювальних манжет з ладу. У роботі підкреслюється важливість контролю технічного стану превенторів та точності їх ремонту для забезпечення безпеки робітників і попередження аварійних ситуацій під час буріння нафтових і газових свердловин.

Ключові слова: противикидне обладнання, флюїдопроявлення, універсальний превентор, імітаційне моделювання, напружено-деформований стан, напруження, контактний тиск.

Вступ. Під час спорудження свердловин на нафту і газ кільцевий простір між бурильною колоною та обсадною або між бурильною колоною та необсадженим інтервалом свердловини зазвичай заповнений буровим розчином. З-поміж багатьох функцій розчину в контексті, що розглядається, першочерговим і важливим є створення гідростатичного тиску, який перешкоджає притоку пластових флюїдів у стовбур свердловини. Коли бурове долото пробурює продуктивний нафтогазовий пласт, або проходить крізь інші ділянки з аномальним тиском, рівновага, створена за допомогою бурового розчину, порушується, і пластові флюїди потрапляють у стовбур свердловини. Протягом усього процесу буріння ці рідини під дією пластової енергії намагаються пройти через кільцевий простір назовні. В

урівноваженні пластового тиску гідростатичним тиском бурового розчину, що досягається підбиранням та зміною його густини, і полягає первинний контроль (первинний бар'єр) свердловини в процесі її спорудження. У разі отримання персоналом прямих ознак, які сигналізують про руйнування первинного бар'єру та вказують на початок процесу флюїдопрояву, необхідною є щонайшвидша активація комплексу противикидного обладнання (ПВО) – вторинного контролю (вторинного бар'єру) з метою перекриття каналів виходу рідин на поверхню і унеможливлення подальшого неконтрольованого розвитку процесу флюїдопрояву. Основною та невід'ємною частиною будь-якого комплексу ПВО є кільцеві (універсальні), плашкові, обертові превентори та дивертори – в умовах буріння на морських акваторіях і окремих випадках буріння на суходолі. Аварії під час спорудження свердловин можуть призвести до людських жертв, екологічних катастроф та великих матеріальних витрат [1-3], тож універсальний превентор є одним із найвідповідальніших елементів системи ПВО бурової установки.

До противикидного обладнання завжди висувалися та висуваються надзвичайно високі вимоги на усіх етапах його життєвого циклу: проектування, випробовування, експлуатації, обслуговування та ремонту. Необхідно зауважити, що існуючі конструкції превенторів вдосконалюються з метою підвищення надійності.

До складу ПВО, як правило, входять універсальний превентор та два плашкові або один здвоєний плашковий. Універсальні превентори дозволяють повертати та протягувати колони труб та інструменту за умов загерметизованого устя. Основним робочим елементом універсального превентора є кільцевий ущільнювач. У відкритому положенні в превенторі внутрішній діаметр ущільнювача є достатнім для проходження колони труб та необхідного інструменту, а у закритому положенні – ущільнювач обтискає колону і герметизує кільцевий міжтрубний простір або повністю перекриває свердловину за відсутності бурильної колони. За рахунок еластичності гумового ущільнювача кільцевий превентор можна закривати на елементах різного діаметру та форми поперечного перерізу: бурильних трубах, ведучій трубі, замках, обважених бурильних трубах, центраторах тощо; закриття превентора також можливе і на свердловині без

бурильної колони та інструменту. Стискання ущільнювача здійснюється в результаті комбінованої дії тиску на нього та дещо відрізняється за принципом дії у конструкціях різних виробників.

Аналіз закордонних і вітчизняних досліджень та публікацій. У процесі спорудження свердловин під депресією корпус бурильної труби та її з'єднання багаторазово проходять через ущільнювач універсального превентора, що призводить до змінного циклічного навантаження на нього та втомного руйнування. Виходячи з передумови ефективності роботи ущільнення, для збільшення терміну його експлуатації в роботі [4] спочатку було проведено випробовування гумового зразка при дії одноосового розтягу та стиску. В результаті було визначено модель поведінки цього матеріалу (модель Yeoh) та константи, які описують матеріал, а також отримано рівняння для застосування під час використання імітаційного моделювання методом скінченних елементів. Пізніше за допомогою програмного забезпечення ABAQUS було створено тривимірну модель гумового ущільнювача для моделювання процесу динамічного ущільнення методом скінченних елементів. Проаналізовано контактний тиск та розподіл еквівалентних напружень за Мізесом і їх зміну на поверхні ущільнення. Точність результатів, отриманих методом скінченних елементів, було перевірено шляхом їх порівняння з результатами натурних випробувань. Згодом було досліджено вплив структурних параметрів, таких як внутрішній кут, зовнішній кут та внутрішній діаметр на напруження, що виникають на поверхні ущільнювача. Ці параметри були оптимізовані експериментальним шляхом. Оптиміальними встановлено такі параметри: внутрішній кут – 29°, зовнішній кут – 69° та внутрішній діаметр – 84 мм. Максимальні величини напружень за Мізесом після оптимізації було зменшено на 2,48 МПа, а амплітуду цих напружень – на 42%. Обрані оптимальні параметри гумового ущільнювача застосовано для проведення натурних випробувань. Згідно з отриманими результатами гумовий ущільнювач після проведеної оптимізації має хороші герметизуючі властивості та значно вищу втомну довговічність.

У статті [5] в подвійному плунжерному превенторі (BOP 2FZ54-105) проаналізовано розподіл напружень та області їх концентрації при дії робочих навантажень за допомогою

методу скінченних елементів та експериментальних випробовувань. Виявлено, що результати імітаційного моделювання добре узгоджуються з результатами експериментальних випробовувань, а доцільність та точність цих двох методів підтверджуються взаємно. Крім того, у статті підтверджується, що міцність корпусу превентора відповідає проектним вимогам та умовам його використання. Області концентрації напружень на внутрішній та зовнішній поверхнях корпусу були узагальнені та отримані на основі комплексного аналізу. Застосовані у статті методи та отримані результати можуть слугувати базою для модифікованого проектування корпусу та посібником для технічного обслуговування превентора, оцінки його безпеки під час експлуатації.

Під час буріння на нафту та газ кільцевий превентор противикидного обладнання постійно піддається дії високого тиску та ударним навантаженням, що призводить до концентрації напружень у деяких областях конструкції. В результаті цього можуть утворитись тріщини та втомні пошкодження. Верхня кришка та корпус кільцевого превентора є основними деталями, які піддаються дії високого тиску. Якщо вони вийдуть з ладу під час роботи превентора, то може статись аварія з вибухом, що може призвести до людських жертв та значних економічних збитків. Тому області концентрації напружень у верхній кришці та корпусі превентора необхідно проаналізувати з метою забезпечення їх безпечної експлуатації. У цій роботі [6] розроблено високоточний підхід до визначення напружень. Цей підхід поєднує метод теоретичного розрахунку, метод скінченних елементів та експериментальні випробування. Величини та розподіл напружень у верхній кришці та корпусі вимірювалися за номінального робочого тиску і гідростатичного випробувального тиску. Більше того, результати, які отримані методом скінченних елементів, були майже ідентичними результатам експериментальних випробувань для значень напружень у точках контролю. Результати аналізу скінченних елементів показали, що в корпусі наявні дві критичні області напружень. Тут в минулому фактично й виникали тріщини та руйнування. Основний технічний внесок дослідження полягає в тому, що воно може слугувати основою для додаткових досліджень з оцінки втомної

міцності та оцінки залишкового ресурсу елементів превенторів.

Мета роботи та обґрунтування необхідності її виконання

Мета роботи полягає у встановленні напружено-деформованого стану елементів універсального превентора із врахуванням величини зазору між його корпусом та поршнем.

Для досягнення поставленої мети необхідно:

– побудувати тривимірну модель універсального превентора;

– встановити напружено-деформований стан елементів превентора із врахуванням величини зазору між його корпусом та поршнем, використавши для цього імітаційне моделювання.

Викладення основного матеріалу

Для проектування різноманітного обладнання застосовують комп'ютерні програми, серед яких SolidWorks [7]. Ця програма з'явилась в 1993 році та склала конкуренцію таким продуктам, як AutoCAD та Autodesk Mechanical Desktop, SDRC I-DEAS і Pro/ENGINEER, Solid Edge. Завдання, які можна вирішити за допомогою цієї програми наступні: конструкторська підготовка виробництва (3D проектування виробів будь-якого ступеня складності з урахуванням специфіки виготовлення; створення конструкторської документації; промисловий дизайн; проектування комунікацій (електроджгутів, трубопроводів тощо.) та багато інших.

У програмі SolidWorks наявний модуль Simulation, у якому проводиться інженерний аналіз (міцність, стійкість, теплопередача, частотний аналіз, динаміка механізмів тощо). Алгоритм цих досліджень базується на застосуванні методу скінченних елементів. Необхідно зауважити, що отримані на основі цього методу результати використовуються практично у всіх галузях науки й техніки.

З метою дослідження напружено-деформованого стану елементів універсального превентора типу Hydril (далі - превентора) у програмі SolidWorks побудовано його тривимірну модель (рис. 1).

Розроблену тривимірну модель превентора можна досліджувати як загалом комплексом, так і поелементно. У нашому випадку для дослідження із тривимірної моделі універсального превентора вибрано тільки дві деталі – поршень 8 та корпус 1 (рис. 2).

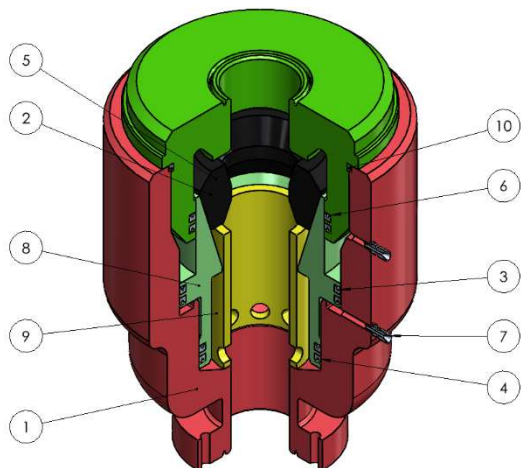


Рис. 1. Тривимірна модель універсального преветратора:

1 – корпус; 2 – ущільнювач; 3, 4, 6 – ущільнення;
5 – кришка; 7 – штуцер; 8 – поршень; 9 – втулка;
10 – гайка

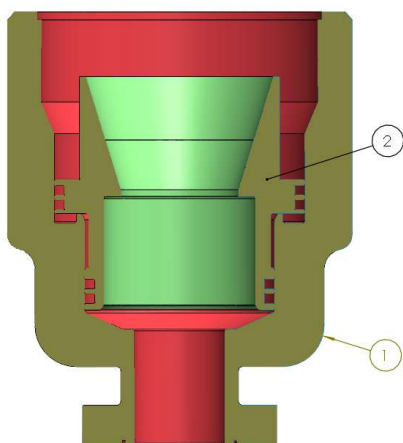


Рис. 2. Тривимірна модель елементів універсального преветратора:

1 – корпус; 2 – поршень

Оскільки тривимірна модель преветратора є габаритною та має циліндричну форму, то використано осесиметричну постановку (оскільки елементи конструкції преветратора виконані як тіла обертання і мають спільну вісь). Для цього попередньо побудована спільна вісь для двох деталей преветратора, а при виборі дослідження (точніше при його налаштуванні) вказано площину поділу моделі та вищезгадану вісь.

Досліджувана осесиметрична модель зображена на рисунку 3.

Матеріалами деталей преветратора під час імітаційного моделювання прийнято сталь. Схему граничних умов наведено на рисунку 4.

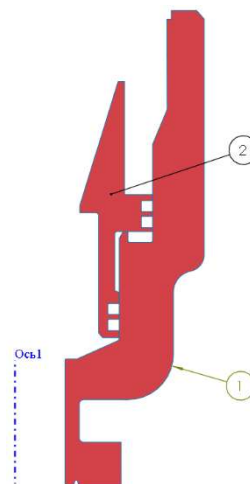


Рис. 3. Осесиметрична модель універсального преветратора:

1 – корпус; 2 – поршень

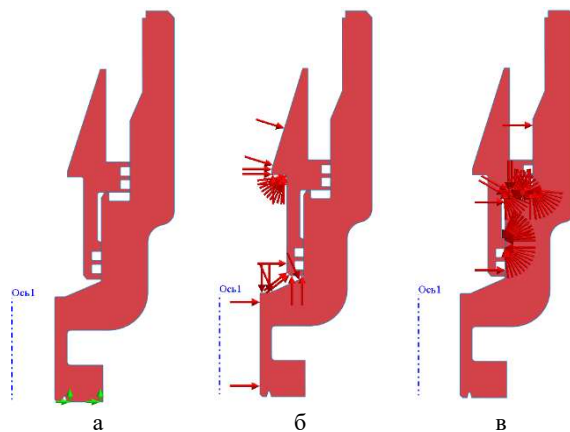


Рис. 4. Схема граничних умов:

а – фіксування корпусу преветратора;
б – дія тиску робочого середовища (70 МПа);
в – дія тиску гідропривода (14 МПа)

Зазорів між корпусом та поршнем преветратора наведено на рисунку 5.

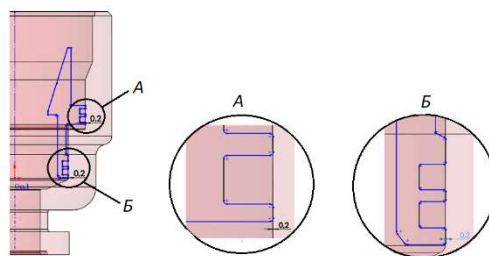


Рис. 5. Зазори між корпусом та поршнем преветратора

У дослідженні враховано дві пари контактів деталей: по нижньому зазору (нижні ущільнення); по верхньому зазору (верхні ущільнення) (рис. 6). Коефіцієнт тертя між ними прийнято рівним 0,2.

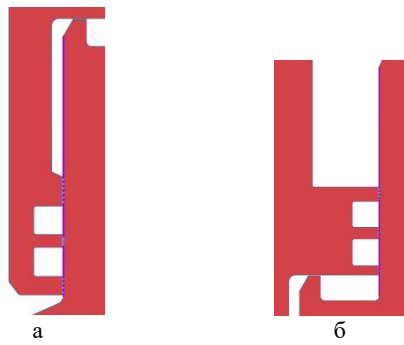


Рис. 6. Контакти деталей преვენтора: а – перша пара контату; б – друга пара контакту

З метою отримання точніших результатів імітаційного моделювання під час побудови сітки скінченних елементів використано інструмент, який дозволив зменшити розміри елементів сітки. Отримана сітка скінченних елементів наведена на рисунку 7.

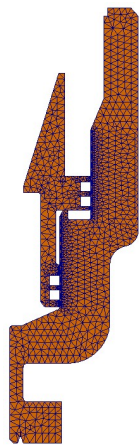


Рис. 7. Сітка скінченних елементів

На рисунках 8-11 наведено результати проведеного імітаційного моделювання.

Проаналізувавши розподіл та величини еквівалентних напружень за Мізесом, встановлено, що їх максимальні значення становлять 760 МПа та концентруються у нижній частині корпусу преვენтора. Максимальні переміщення при заданих граничних умовах складають 0,54 мм. Необхідно зауважити, що найбільших переміщень зазнає корпус преვენтора, а не поршень, оскільки останній впирається у внутрішню поверхню корпусу, за рахунок чого і обмежуються його переміщення. При цьому навантаження передається на корпус, та у ділянці їх взаємодії виникає контактний тиск, максимальне значення якого становить 320 МПа за величини зазору 0,1 мм між корпусом та поршнем. Із збільшенням зазору величина

контактного тиску знижується. При зазорі 0,4 мм поршень перестає контактувати із корпусом.

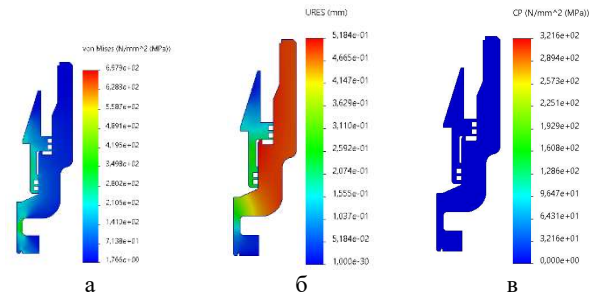


Рис. 8. Результати імітаційного моделювання при зазорі між поршнем та корпусом преვენтора величиною 0,1 мм: а – еквівалентні напруження за Мізесом; б – переміщення; в – контактний тиск

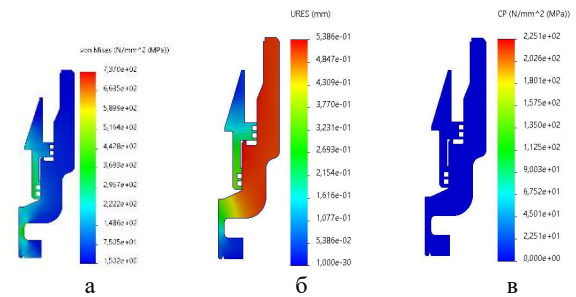


Рис. 9. Результати імітаційного моделювання при зазорі між поршнем та корпусом преვენтора величиною 0,2 мм: а – еквівалентні напруження за Мізесом; б – переміщення; в – контактний тиск

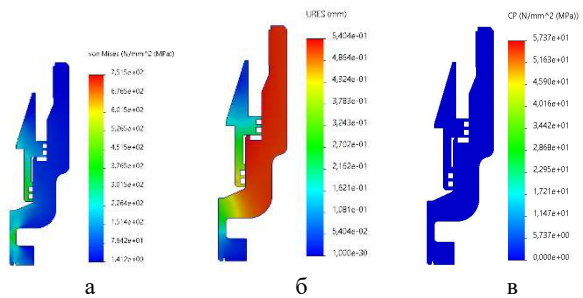


Рис. 10. Результати імітаційного моделювання при зазорі між поршнем та корпусом преვენтора величиною 0,3 мм: а – еквівалентні напруження за Мізесом; б – переміщення; в – контактний тиск

Отже, з аналізу результатів імітаційного моделювання встановлено, що величина зазору між поршнем та корпусом преვენтора впливатиме на напружено-деформований стан цих елементів і, відповідно, зі збільшенням величини зазору поверхні поршня не контактуватимуть із внутрішніми поверхнями корпусу. При цьому, робота ущільнюючих

елементів буде ускладнена. Ускладнення полягатиме в тому, що при збільшенні зазору між корпусом та поршнем та при дії тиску ущільнення витискатиметься у зазор. Внаслідок цього буде пришвидшуватись його вихід з ладу. Тому під час ремонту необхідно слідкувати за величиною відповідних розмірів елементів превентора та їх станом, оскільки від цього значно залежить безпека робітників, що його експлуатують, екологічна безпека тощо.

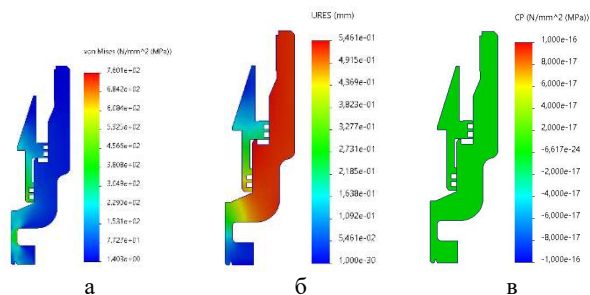


Рис. 11. Результати імітаційного моделювання при зазорі між поршнем та корпусом превентора величиною 0,4 мм:

а – еквівалентні напруження за Мізесом;
б – переміщення; в – контактний тиск

Висновки

Для прискореного та більш повного дослідження напружено-деформованого стану елементів універсального превентора побудовано його тривимірну модель. Під час дослідження застосовано осесиметричну модель елементів превентора, що дозволило пришвидшити процес імітаційного моделювання, не знижуючи точність отримуваних результатів.

За результатами імітаційного моделювання встановлено ділянку концентрації максимальних напружень у корпусі превентора та величини цих напружень, які становлять 760 МПа при заданих граничних умовах. Також встановлено, що при зазорі між корпусом і поршнем величиною 0,1 мм відбувається їх взаємодія, яка призводить до виникнення контактного тиску величиною 320 МПа. При величині зазору 0,4 мм поршень з корпусом не контактують. У випадку збільшення величини зазору між поршнем та корпусом погіршуються умови роботи ущільнюючих елементів, що може призвести до передчасного виходу їх з ладу.

Література

1. Jon Espen Skogdalen, Ingrid B. Utne, Jan Erik Vinnem, Developing safety indicators for preventing offshore oil and gas deepwater drilling blowouts. *Safety Science*. 2011. Vol. 49. Iss. 8-9. P. 1187-1199. ISSN 0925-7535. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2011.03.012>.
2. Bubbico R.; Lee S.; Moscati D.; Paltrinieri N. Dynamic assessment of safety barriers preventing escalation in offshore Oil&Gas. *Saf. Sci.* 2019. Vol. 121. P. 319-330.
3. Necci A., Tarantola S., Vamanu B., Krausmann E., Ponte L. Lessons learned from offshore oil and gas incidents in the Arctic and other ice-prone seas. *Ocean. Eng.* 2019. Vol. 185. P. 12–26.
4. Guo Lianglin, Zeng Yijin, Huang Jian, Wang Zhiliang, Li Junxiong, Han Xueying, Xia Chengyu, Qian Liqin. Fatigue Optimization of Rotary Control Head Rubber Core Based on Steady Sealing. *Engineering Failure Analysis*. 2021. Vol. 132. art. 105935. URL: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021.105935>.
5. Li Wang, Tang Yang, Liu Qingyou, He Yufa. Simulation and experimental analysis of critical stress regions of deep-water annular blowout preventer. *Engineering Failure Analysis*. 2019. Vol. 106. art. 104161. URL: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2019.104161>
6. Li Wang, Tang Yang, Liu Qingyou, He Yufa. Simulation and experimental analysis of critical stress regions of deep-water annular blowout preventer. *Engineering Failure Analysis*. 2019. Vol. 106. art. 104161. URL: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2019.104161>.
7. Dassault Systemes. *Theoretical Manual Solid-Works Simulation*. Dassault Systemes, 2015. 114 p

References

1. Jon Espen Skogdalen, Ingrid B. Utne, Jan Erik Vinnem, Developing safety indicators for preventing offshore oil and gas deepwater drilling blowouts. *Safety Science*. 2011. Vol. 49. Iss. 8-9. P. 1187-1199. ISSN 0925-7535. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2011.03.012>.
2. Bubbico R.; Lee S.; Moscati D.; Paltrinieri N. Dynamic assessment of safety barriers preventing escalation in offshore Oil&Gas. *Saf. Sci.* 2019. Vol. 121. P. 319-330.
3. Necci A., Tarantola S., Vamanu B., Krausmann E., Ponte L. Lessons learned from offshore oil and gas incidents in the Arctic and other ice-prone seas. *Ocean. Eng.* 2019. Vol. 185. P. 12–26.
4. Guo Lianglin, Zeng Yijin, Huang Jian, Wang Zhiliang, Li Junxiong, Han Xueying, Xia Chengyu, Qian Liqin. Fatigue Optimization of Rotary Control Head Rubber Core Based on Steady Sealing. *Engineering Failure Analysis*. 2021. Vol. 132. art. 105935. URL: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021.105935>.

5. Li Wang, Tang Yang, Liu Qingyou, He Yufa. Simulation and experimental analysis of critical stress regions of deep-water annular blowout preventer. *Engineering Failure Analysis*. 2019. Vol. 106. art. 104161. URL: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2019.104161>
6. Li Wang, Tang Yang, Liu Qingyou, He Yufa. Simulation and experimental analysis of critical stress regions of deep-water annular blowout preventer. *Engineering Failure Analysis*. 2019. Vol. 106. art. 104161. URL: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2019.104161>.
7. Dassault Systemes. *Theoretical Manual Solid-Works Simulation*. Dassault Systemes, 2015. 114 p

Shostakivskiy I. I., Mosora Y. R., Liakh M. M., Vriukalo V. V., Mykhailiuk V. V., Borushchak L. O. Study of the stress-strain state of the elements of the annular preventor

The article considers the role and design features of blowout prevention equipment, in particular the annular preventer, which is used during the drilling of oil and gas wells. The casing and drilling string separate the wellbore, and the annular gap between them is filled with drilling fluid, which creates hydrostatic pressure to control the release of formation fluids. The annular preventer, as a part of blowout prevention equipment, provides sealing of the annular space, allowing simultaneous rotation and threading of drill pipes, which increases the safety and efficiency of the drilling process. The work also provides information related to the analysis of foreign and domestic research and publications on the topic of the study. The main working element in the design of the annular preventer is an annular rubber seal, which is subjected to cyclic loads and fatigue failure due to the passage of the drilling string through it. However, the body and piston of the annular preventer are subjected to high pressure, which leads to the emergence and concentration of significant stresses in certain areas. In order to determine the magnitudes and zones of stress concentration, a three-dimensional model of an annular preventer was built. Only two of its elements were used for the study: the housing and the piston. The pressures used during the study were 14 and 70 MPa. The study took into account

the gap between the housing and the piston. It was found that with small gaps between the piston and the housing under the adopted boundary conditions, their interaction occurs, as a result of which contact pressure appears. The maximum value of this pressure is 320 MPa with a gap between the working surfaces of the housing and the piston of 0.1 mm. With a gap of 0.4 mm and similar boundary conditions, contact pressure is not observed. Further increase in the gap may lead to faster failure of the sealing collars. The work emphasizes the importance of monitoring the technical condition of annular preventers and the accuracy of their repair to ensure the safety of workers and prevent emergencies during the drilling of oil and gas wells.

Keywords: well construction, anti-fallout equipment, fluid manifestation, annular preventer, simulation modeling, stress-strain state, stress, contact pressure.

Шостаківський Ігор Іванович – старший викладач кафедри нафтогазових машин та обладнання Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Мосора Юрій Романович – старший викладач кафедри нафтогазових машин та обладнання Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Лях Михайло Михайлович – к.т.н, професор кафедри нафтогазових машин та обладнання Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Врюкало Віктор Володимирович – к.т.н, доцент кафедри кафедра комп'ютеризованого машинобудування Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Михайлюк Василь Володимирович – к.т.н, доцент кафедри нафтогазових машин та обладнання Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Борушак Любомир Онуфрійович – к.т.н, доцент кафедри кафедра комп'ютеризованого машинобудування Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Стаття подана 10.03.2025.

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-290-4-48-56>

УДК 678.01:536

АДИТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ СТВОРЕННЯ ТЕПЛОПРОВІДНИХ ПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИТІВ

Пушкаръов Д.В., Слєпцов О.О., Сова Н.В., Савченко Б.М.

ADDITIVE TECHNOLOGIES FOR CREATING THERMAL CONDUCTIVE POLYMER COMPOSITES

Pushkarov D.V., Slietsov A.O., Sova N.V., Savchenko B.M.

У роботі досліджено вплив складу полімерного композиту та параметрів його адитивного виробництва, на значення його теплопровідності. У якості полімерної матриці для досліджень було використано типовий для адитивного виробництва, екологічний та доступний полімерний матеріал - полілактид. До складу композиту вводили, різні за природою, теплопровідні наповнювачі — порошкоподібну мідь і графіт, у різних масових співвідношеннях, з метою підвищення теплопровідності та забезпечення можливості керування тепловими характеристиками матеріалу. Композитні матеріали було створені шляхом змішування складових у розплаві на двошнековому екструдері. Адитивне виробництво дослідних зразків здійснювалось за технологією виробництва наплавленням філаменту. Матеріал для адитивного виробництва у вигляді філаменту отримували з композитного матеріалу шляхом екструзії. Зразки друкували з орієнтацією шарів паралельно та перпендикулярно до напрямку теплового потоку, що дозволило оцінити вплив просторового розташування струменів матеріалу на анізотропію теплопровідності.

Композитні матеріали на основі полілактиду, отримані класичним методом лиття під тиском та методом адитивного виробництва, показали близькі значення теплопровідності. Використання мідних і графітових наповнювачів дозволило суттєво підвищити теплопровідність матеріалу—у понад два рази. Орієнтація шарів та розташування струменів матеріалу щодо напрямку теплового потоку має значний вплив на його теплопровідність. Встановлено, що графітовий наповнювач є більш ефективним у порівнянні з мідним, оскільки забезпечує більш значний приріст теплопровідності навіть за меншого масового вмісту. Крім того, вплив орієнтації шарів і наповнювача більш виражений для

графітових наповнювачів. Такий підхід може дозволити розробляти легкі, ефективні з точки зору тепловідведення полімерні елементи корпусів для електроніки, які мають як функціональне, так і конструкційне значення. Анізотропія теплопровідності, контрольована за допомогою параметрів друку, відкриває нові можливості для інженерного проектування складних виробів з оптимізованими теплофізичними характеристиками.

Ключові слова: полілактид, полімерні композитні матеріали, теплопровідні композити, адитивні технології, графіт, мідь.

Вступ. Зі стрімким розвитком мікроелектронних технологій сучасне електронне обладнання стає все більш і більш складним. Робота сучасних комп'ютерів виділяє велику кількість тепла за рахунок їх компактних розмірів, покращеної швидкодії та підвищеного споживання енергії. В даний час всі зусилля спрямовані на покращення процесу охолодження електронних компонентів з високим тепловим потоком[1].

Історично традиційним матеріалом для виготовлення корпусних деталей електронної техніки є метали, найбільш часто залізо та алюміній. Сучасна техніка в зростаючій мірі застосовує полімерні матеріали, що вирізняються високою технологічністю, доступністю складних форм та що особливо актуально – низькою густиною[2-4]. Маючи великий перелік переваг полімерні матеріали володіють рядом недоліків, зокрема горючість, дуже низька теплопровідність та низька

стійкість до ультрафіолетового випромінювання [5, 6]. Теплопровідність полімерних матеріалів може бути збільшена шляхом створення композитних матеріалів з застосуванням дисперсних наповнювачів котрі мають високе значення теплопровідності [7]. Даний підхід застосовують в промислових масштабах для виробництва деталей корпусу джерел світла на основі випромінюючих світло діодів. Найбільш масовою технологією переробки теплопровідних композитів є лиття під тиском та екструзія повздожних виробів.

В сучасних умовах в Україні та світі значного промислового значення набуває технологія адитивного виробництва виробів. Особливу роль вона відіграє в Україні під час війни певним чином компенсуючи колапс традиційних способів виробництва. Найбільш поширеною технологією адитивного виробництва є виробництво наплавленням філаменту (FFF), що використовує полімерну сировину у вигляді філаменту, котра розплавляється та подається у зону побудови за допомогою програмно керованої системи просторового переміщення [8, 9]. Адаптація теплопровідних композитів для застосування у адитивному виробництві має високе практичне значення в умовах України, так як виробництво деталей корпусів електронних пристроїв є досить поширеним застосуванням, зокрема для галузі безпілотних систем та електроніки. Застосування теплопровідних композитів для адитивного виробництва передбачає можливість створення витратних матеріалів у вигляді філаменту або мононитки, котра володіє комплексом механічних властивостей необхідних для самого виробництва (намотування) а також для успішного використання у для пристроїв, зокрема ламкість, різновтовщинність та ряд інших. Традиційними наповнювачами для теплопровідних композитів є нітрид бору та дисперсні порошкові метали такі як мідь та алюміній, вони вирізняються високою вартістю та що головне є важко доступними на Україні.

Найбільш важливими теплофізичними характеристиками корпусних деталей, як і будь-яких матеріалів є теплопровідність, температуропровідність, теплоємність, коефіцієнт теплового лінійного (або об'ємного) розширення. Температуропровідність залежить від питомої теплоємності та густини матеріалу. Знання теплофізичних характеристик необхідне для розробки корпусів теплообмінної апаратури, електричних двигунів,

електроприладів, обмоток електричних машин, елементів радіо - і електронної апаратури. Теплопровідність шару матеріалу визначає чутливість термоіндикаторних покриттів, а коефіцієнт теплового лінійного розширення - значення термічної напруги в покриттях [10].

Теплопровідність більшості полімерних матеріалів у 100 - 400 разів менша за теплопровідність сталі і майже у 1000 разів менша за теплопровідність міді. Це обумовлює погану теплопередачу від забарвлених нагрітих виробів і ускладнює їхнє швидке нагрівання. Характерно, що тепло- та температуропровідність виробів на основі кристалічних полімерів вища, ніж виробів, виготовлених з аморфних полімерів. Питома теплоємність полімерних плівок за нормальних умов приблизно вдвічі вище питомої теплоємності скла і в 3-5 разів вище теплоємності металів [11].

Теплофізичні властивості полімерних матеріалів змінюються зі зміною температури, при цьому температурна залежність у разі кристалічних полімерів має більш складний характер, ніж аморфних [12].

Теплофізичні властивості полімерних матеріалів суттєво змінюються при наповненні їх [13]. У мінеральних пігментів та наповнювачів тепло- і температуропровідність на 1-2 порядки вища, ніж у полімерних матеріалів. Так, для оксиду цинку теплопровідність складає 19,5 Вт/(м·К), а для діоксиду титану - 9,86 Вт/(м·К). Особливо помітно покращують тепло- та температуропровідність плівок металеві порошки (цинковий пил, алюмінієва пудра, бронза, залізна слюда), а також оксиди металів з високими значеннями теплопровідності. Зниження теплоізолюючих властивостей полімерних матеріалів може бути досягнуто зменшенням товщини покриттів. Навпаки, для підвищення теплоізоляції (створення "тепліх" покриттів) застосовують як наповнювачі мікроазбест, деревне борошно, скляні та пластмасові мікросфери (синтактові піни), кероген сланцю, лігнін та ін. [14].

Автори [15] оцінювали можливість створення високотеплопровідних композитів на основі полівінілбутиралу, в який вводили як наповнювач графен в кількості 30% мас. При цьому спостерігалось зростання теплопровідності композиту практично в 20 разів. Створені композити придатні для використання при створенні корпусів електронних пристроїв і забезпечення

відведення надлишкового тепла, а також для елементів гнучких електронних пристроїв [16].

В роботі [17] було досліджено зміну теплопровідності сумішей поліетилен /поліпропілен при додаванні 10% мас нітриду бору. Введення наповнювача дозволяє покращити теплопровідність більше ніж на 57%.

Індустріалізація та четверта промислова революція зумовили стрімке проникнення адитивних технологій у всі сфери промисловості. Швидкість, відносна простота виготовлення надскладних форм та об'єктів забезпечують адитивним технологіям широке застосування у сфері електроніки, електротехніки при створенні корпусів, та окремих елементів пристроїв [18]. Створення полімерних композитів придатних до адитивного виробництва з покращеними теплопровідними властивостями відкриває нові можливості в організації відведення надлишкового тепла в електропристроях.

В роботі [19] досліджували можливість створення високотеплопровідних композитів на основі поліаміду 12, наповненого графеном та вуглецевими нанотрубками. Введення 15% мас графену та 1% мас нанотрубок зумовлює зростання теплопровідності композиту на 160%. Крім того, створений композит придатний до переробки методом адитивного виробництва і характеризується покращеною здатністю до формування виробів методом наплавлення розплаву полімеру. Також комбінація параметрів адитивного виробництва забезпечує орієнтацію частинок наповнювача в полімерному шарі, що має значний вплив на значення його теплопровідності.

Постановка завдання. Теплопровідні полімерні композити є перспективними матеріалами, що можуть мати широке застосування, проте існує низка проблем, що перешкоджають цьому. Звичайне збільшення вмісту, хаотично розподіленого, теплопровідного наповнювача може покращити теплопровідність композитів, але не дозволяє точно контролювати цей параметр у визначеному напрямку. Одним із шляхів подолання виниклих проблем може стати використання адитивних технологій виробництва теплопровідних полімерних матеріалів. Теплопровідні композити для 3д друку є перспективним напрямом, який потребує подальших досліджень. Використання різних типів наповнювачів, регулювання параметрів адитивного виготовлення це ключові стратегії, що дозволяють більш точно

регулювати теплопровідність композитів у різних напрямках.

Метою роботи є дослідження впливу складу полімерного композиту та параметрів його адитивного виробництва на значення його теплопровідності.

Матеріали та методи. Для створення композитів з підвищеною теплопровідністю було обрано полімерну матрицю полілактид марки Total Corbion Luminy LX175, що масово використовується для адитивного виробництва. Композитні наповнювачі, такі як порошкоподібна мідь та графіт (марки C0) обрано завдяки їх широкій доступності в Україні.

На початковому етапі дослідження було створена серія композитних матеріалів основи полілактиду, міді та графіту. Склад композицій наведено у табл. 1.

Таблиця 1

Склад досліджених композицій

Компонент	Вміст, % мас.				
	ПЛА1	ПЛА2	ПЛА3	ПЛА4	ПЛА5
Полілактид	100	50	40	80	70
Мідь	-	50	60	-	-
Графіт	-	-	-	20	30

Гранульований полілактид подрібнювали на ножовій дробарці оснащений ситом з діаметром отворів 2 мм до порошкоподібного стану. Порошковий полілактид змішували з наповнювачами на планетарному змішувачі та піддавали сушінню на протязі 6 годин при температурі 45°C в сушарній шафі. Суміші переробляли на двошнековому екструдері в температурному діапазоні 190-210°C та одержували гранульований композитний матеріал. Гранульований композитний матеріал сушили при температурі 45°C, після чого на лабораторній литевій машині гранульовані композити перетворювали у циліндричні заготовки діаметром 40 мм та товщиною 4 мм. Заготовки обробляли на токарному станку до дослідних зрізів діаметром 15 мм та товщиною 1 мм.

Гранульовані композити були застосовані для виготовлення мононитки шляхом екструзії на лабораторній лінії на основі одношнекового екструдера. В дослідженні представлені композиції котрі були успішно перероблені у мононитку та адитивним виробництвом.

Стандартні зразки для випробування у вигляді таблетки діаметром 15 мм і висотою 1мм виготовляли методом адитивного виробництва з

використанням 3д принтеру Bambu Lab A1 mini. Вихідні композити у вигляді мононитки попередньо підлягали сушінню при температурі 45°C. Модель циліндричної форми перетворювалася у завдання для адитивного виробництва за допомогою застосунку Bambulab Studio 1.0.5 з основними параметрами перетворення наведеними у табл. 2.

Таблиця 2

Параметри перетворення моделі при адитивному виробництві дослідних зразків

Параметр	Значення
Висота шару, мм	0,20
Ширина шару, мм	0,42
Заповнення, %	100
Лінійна швидкість друку заповнення, мм/с	100
Кількість периметрів оболонки, шт.	1
Швидкість друку оболонки, мм/с	50
Температура друку, °C	220
Температура платформи, °C	60
Об’ємна продуктивність друку, мм ³ /с	10
Охолодження виробу, %	40
Діаметр сопла, мм	0,40

Зразок після адитивного виробництва підлягав механічній обробці на токарному верстаті до зразка діаметром 15мм та товщиною 1 мм. Параметри заповнення було підібрані для кожного складу композиту індивідуально з метою забезпечення монолітності зразка, котру контролювали за значенням густоти. Стандартні параметри заповнення не є придатними для композитів розглянутого складу так як вони не забезпечують монолітної структури.

Густину зразків визначали методом гідростатичного зважування згідно ISO 1183-1:2019.

Теплопровідність дослідних зразків визначали методом динамічного калориметра в режимі монотонного розігрівання з використанням приладу - вимірювача теплопровідності ИТ-λ-400 (рис.1) [20]. Вимірювач калібрували за допомогою вимірювання теплопровідності еталонних зразків кварцу та міді.

Теплопровідність матеріалу, що досліджувався визначали за формулою:

$$\lambda = h/R_0, \tag{1}$$

де λ – теплопровідність, Вт/(м·К); h – товщина зразка, м; R_0 - тепловий опір зразка, який визначається за формулою:

$$R_0 = \frac{n_0 \cdot F(1+\sigma_0)}{n_T \cdot K_T} - R_K, \tag{2}$$

де n_0, n_T – вимірюваний в процесі дослідження перепад температур відповідно на зразку і тепломірі; $F = \pi d^2/4$ – площа перерізу зразка, м²; σ_0 – поправка, що враховує теплоємність зразка; K_T – теплова провідність пластини; R_K – поправка до термічного опору контакту (величини K_T і R_K для даної установки є сталими із градусування дослідів).

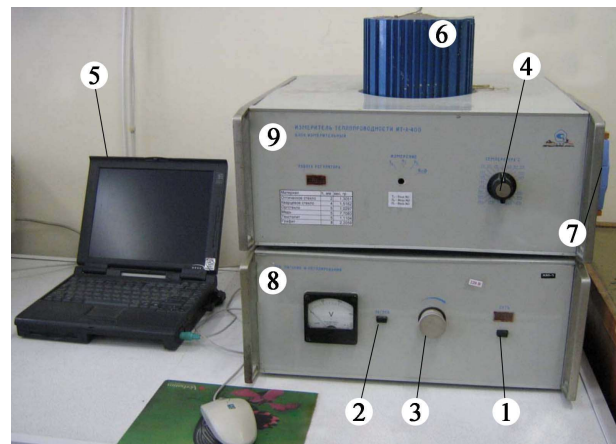


Рис. 1. Загальний вигляд установки для визначення теплопровідності твердих матеріалів.

- 1 – кнопка «включення в мережу»; 2 – кнопка «нагрів»; 3 – регулятор напруги; 4 – установлення температурного рівня виміру; 5 – ноутбук; 6 – комірка виміру; 7 - модуль збору даних; 8 – блок живлення; 9 – вимірювальний блок

Поправка σ_0 визначається за формулою:

$$\sigma_0(t) = \frac{C_0(t)}{2 \cdot [C_0(t) + C_c(t)]}, \tag{3}$$

де $C_0(t), C_c(t)$ – питома теплоємність відповідно зразка і мідного стержня, Дж/К,

$$C_0(t) = C'_a(t) m_0, \tag{4}$$

де $C'_a(t)$ - питома теплоємність зразка, що визначається за довідковими даними; m_0 – маса зразка.

Величина $C'_c(t)$ визначається за таблицею, що знаходиться на стенді установки.

Таким чином, для кожного значення температури стержня t_c під час проведення дослідів розраховується повна теплоємність зразка C_0 , поправку σ_0 , тепловий опір зразка R_0 і теплопровідність зразка λ . Одержане значення теплопровідності відповідає середній температурі зразка

$$t = t_c + 0,5A_t \cdot n_0 \cdot 10^{-3}, \quad (5)$$

де A_t °С/мкВ – чутливість термопар, що визначається за тарувальною таблицею; n_0 — відлік за термоЕРС (електрорушійною силою термопар) у мкВ.

Похибка вимірювання 4-5%.

Результати дослідження. Результати вимірювання теплопровідності та теплоємності литевих зразків в температурному діапазоні від 30 до 60 °С наведено у таблиці 3

Таблиця 3

Теплофізичні характеристики зразків одержаних литтям під тиском

Властивості	Значення					
	ПЛА 1	ПЛА 2	ПЛА 3	ПЛА 4	ПЛА 5	
Густина, кг/дм ³	1,23	2,21	2,54	1,31	1,34	
Теплоємність, Дж/(г·К), при температурі, °С	30	1,395	1,106	0,965	1,326	1,305
	40	1,404	1,094	0,954	1,392	1,374
	50	1,414	1,083	0,942	1,457	1,442
	60	1,433	1,066	0,933	1,508	1,484
Теплопровідність, Вт/(м·К), при температурі, °С	30	0,228	0,453	0,527	0,507	0,563
	40	0,232	0,470	0,553	0,506	0,561
	50	0,236	0,490	0,579	0,509	0,554
	60	0,240	0,510	0,605	0,509	0,553

Теплопровідність зразків, що містять дисперсню мідь та графіт є значно вищою за вихідний полімер. Порівнюючи вплив вмісту наповнювача слід зазначити вищу ефективність графітового наповнювача. Композиція №5, що містить 30 % мас. графітового наповнювача має вищу теплопровідність за композицію, що містить 60 % мас. мідного порошку. Одержаний результат ймовірно пов'язаний з різницею у об'ємному наповненні та більш ефективному утворенні перколяційних ланцюгів графітовим наповнювачем. Для композиції ПЛА5 з графітовим наповнювачем спостерігається зниження теплопровідності зі зростанням температури, що не спостерігається для інших композицій, для композиції ПЛА5 з меншим вмістом графіту зростання теплопровідності з ростом температури є незначним. Можливим поясненням такої поведінки є вплив термічного розширення графітового наповнювача або особливості його теплофізичних властивостей.

Подальші дослідження здійснювалися на зразках композитів, котрі були створені адитивним виробництвом. Важливою особливістю адитивного виробництва є можливість програмного керування напрямком

розподілу шарів та струменів полімеру відносно деталі, котра відтворюється. Зразки було побудовано з різним розподілом шарів відносно осей взірця для вимірювання – паралельно та перпендикулярно до напрямку теплового потоку (рис. 2).

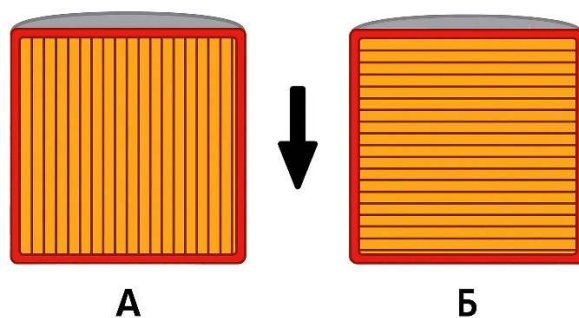


Рис. 2. Спосіб розміщення шарів відносно до напрямку теплового потоку під час адитивного виробництва зразків: А – перпендикулярно; Б – паралельно. Стрілкою показано напрямком теплового потоку при вимірюванні

Стандартним способом розміщення шарів для зразка у формі диску є паралельне розташування. Шляхом варіювання положення зразка відносно платформи побудови було одержано зразки з різними розташуванням шарів та струменів матеріалу відносно площини вимірювання теплофізичних характеристик.

Результати вимірювань властивостей зразків з розташуванням шарів перпендикулярно відносно платформи побудови та паралельно руху теплового потоку руху теплового потоку наведено у табл. 4.

Таблиця 4

Властивості дослідних зразків з розташуванням шарів паралельно до руху теплового потоку (А)

Властивості	Значення					
	ПЛА1	ПЛА2	ПЛА3	ПЛА4	ПЛА5	
Густина, кг/дм ³	1,25	2,27	2,57	1,32	1,36	
Теплоємність, Дж/(г·К) при температурі, °С	30	1,381	1,095	0,955	1,313	1,292
	40	1,390	1,084	0,944	1,378	1,360
	50	1,400	1,072	0,933	1,443	1,428
	60	1,419	1,056	0,924	1,493	1,470
Теплопровідність, Вт/(м·К) при температурі, °С	30	0,227	0,432	0,502	0,532	0,593
	40	0,230	0,436	0,506	0,531	0,591
	50	0,234	0,441	0,512	0,529	0,590
	60	0,238	0,444	0,514	0,528	0,588

Зразки створені адитивним виробництвом з розміщенням шарів паралельно до руху теплового потоку володіють співставними

значенням теплопровідності у порівнянні з литтєвими зразками. Дещо нижче значення спостерігається для ненаповненого зразка та зразків наповнених міддю, що ймовірно пов'язано з впливом дефектів структури. Для зразків наповнених графітовим наповнювачем спостерігається вище значення теплопровідності у порівнянні з литтєвими зразками. Даний ефект ймовірно пов'язаний з орієнтацією часток наповнювача вздовж напрямку здійснення екструзії струменя полімеру, в результаті чого ймовірно відбувається більш ефективна перколяційна контактна теплопередача через частки наповнювача. Для композицій з графітовим наповнювачем спостерігається невелике зниження теплопровідності зі зростанням температури, як і для литтєвих зразків.

Аналіз зразків композиції ПЛА5 за допомогою скануючого електронного мікроскопа показує наявність певної орієнтації частинок наповнювача вздовж напрямку екструзії (рис.3).

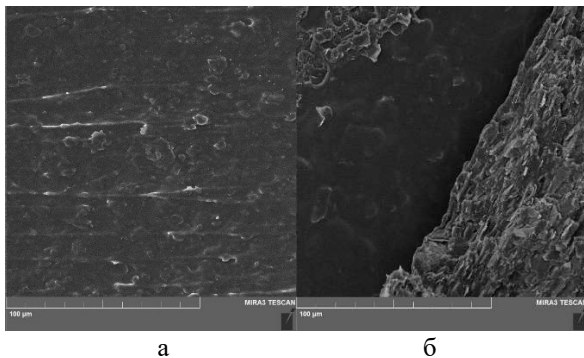


Рис. 3. СЕМ зображення поверхні (а) та зламу (б) композиту ПЛА5 після адитивного виробництва

Результати вимірювань для зразків з розташуванням шарів перпендикулярно до руху теплового потоку в табл. 5.

У порівнянні зі зразками одержаними литтям під тиском для зразків одержаних адитивним виробництвом з розташуванням шарів перпендикулярно до напрямку теплового потоку спостерігається нижче значення теплопровідності для всіх зразків. При цьому для зразків з графітовим наповнювачем спостерігається зростання теплопровідності з ростом температури.

Ймовірним поясненням зниження теплопровідності всіх розглянутих зразків є негативний вплив інтерфейсів між струменями матеріалу у шарах та вагомий вплив орієнтації часток на значення показника.

Таблиця 5

Теплофізичні характеристики дослідних зразків з розташуванням шарів перпендикулярно до руху теплового потоку (Б)

Властивості	Значення					
	ПЛА 1	ПЛА 2	ПЛА 3	ПЛА 4	ПЛА 5	
Густина, кг/дм ³	1,21	2,20	2,52	1,28	1,32	
Теплоємність, Дж/(г·К) при температурі, °С	30	1,409	1,117	0,975	1,339	1,292
	40	1,418	1,105	0,963	1,405	1,360
	50	1,428	1,094	0,952	1,472	1,428
	60	1,447	1,077	0,942	1,523	1,470
Теплопровідність, Вт/(м·К) при температурі, °С	30	0,205	0,405	0,500	0,501	0,532
	40	0,210	0,406	0,525	0,496	0,527
	50	0,214	0,435	0,550	0,489	0,525
	60	0,221	0,436	0,574	0,485	0,523

Висновки. Зразки композитних матеріалів на основі полілактиду одержані класичним способом лиття під тиском та адитивним виробництвом володіють співставними властивостями теплопровідності. Наповнення мідним та графітовим наповнювачем призводить до значного збільшення теплопровідності, до понад 2 рази. Розташування струменів та шарів розподілу матеріалу вздовж та поперек руху теплового потоку у зразку призводить до помітного впливу на теплопровідність. Графітовий наповнювач у полілактиді є більш ефективним за мідний та збільшує теплопровідність більш ефективно при меншому масовому вмісті. Вплив орієнтації шарів спостерігається для графітового наповнювача значно помітніше. Композитні матеріали з теплопровідними наповнювачами можуть бути ефективно використані в адитивному виробництві деталей, котрі вимагають підвищеної теплопровідності та можуть успішно замінити вироби виготовлені литтям під тиском. Орієнтація шарів та струменем матеріалу у поєднанні з шаруватим наповнювачем здатна збільшувати теплопровідність матеріалу, що може бути корисно використано під час проектування виробів. Виміряні значення теплопровідності та теплоємності можуть бути використані під час розробки та проектування виробів що потребують підвищеної або точно відомої теплопровідності.

Література

1. Yao, F., You, G., Zeng, S., Lu, D., & Ming, Y. Reaction-tunable diffusion bonding to multilayered Cu mesh/ZK61 Mg foil composites with thermal conductivity and lightweight synergy. *Journal of Materials Science & Technology*, 2023. 139, 10-22.
2. Zhao, H., Zhang, W., Yin, X., Wu, Y., Du, C., Zhao, W., ... & Liu, C. Conductive polyurethane elastomer electrolyte (PUEE) materials for anodic bonding. *RSC advances*, 2020. 10(22), 13267-13276.
3. Olivera, A. F., Chica, E., & Colorado, H. A. Design and manufacturing with 3D printing and life cycle analysis of a recyclable polymer-based H-Darrieus wind turbine. *Engineered Science*, 2024. 31, 1156.
4. Li, T., Wei, H., Zhang, Y., Wan, T., Cui, D., Zhao, S., ... & Cheng, B. Sodium alginate reinforced polyacrylamide/xanthan gum double network ionic hydrogels for stress sensing and self-powered wearable device applications. *Carbohydrate Polymers*, 2023. 309, 120678.
5. Liu, X., Zhang, J., Zheng, C., Xue, J., Huang, T., Yin, Y., ... & Guiver, M. D. Oriented proton-conductive nano-sponge-facilitated polymer electrolyte membranes. *Energy & Environmental Science*, 2020. 13(1), 297-309.
6. Ruan, K., Guo, Y., & Gu, J. Liquid crystalline polyimide films with high intrinsic thermal conductivities and robust toughness. *Macromolecules*, 2021. 54(10), 4934-4944.
7. Kwon, Y. J., Kim, Y., Jeon, Y. P., Hong, J. Y., Park, H. S., & Lee, J. U. Thermally conducting yet electrically insulating epoxy nanocomposites containing aluminum electrochemically exfoliated graphene hybrid. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2022. 152, 106675.
8. Ji, J., Chiang, S. W., Liu, M., Liang, X., Li, J., Gan, L., ... & Du, H. Enhanced thermal conductivity of alumina and carbon fibre filled composites by 3-D printing. *Thermochimica acta*, 2020. 690, 178649.
9. Doshi, M., Mahale, A., Singh, S. K., & Deshmukh, S. Printing parameters and materials affecting mechanical properties of FDM-3D printed Parts: Perspective and prospects. *Materials Today: Proceedings*, 2022. 50, 2269-2275.
10. Mamunya, Y. P., Davydenko, V. V., Pissis, P., & Lebedev, E. V. Electrical and thermal conductivity of polymers filled with metal powders. *European polymer journal*, 2002. 38(9), 1887-1897.
11. Zhong, C., Yang, Q., & Wang, W. Correlation and prediction of the thermal conductivity of amorphous polymers. *Fluid Phase Equilibria*, 2001. 181(1-2), 195-202.
12. Колупаєв, Б. Б. Математичне моделювання теплопровідності лінійних гнучколанцюгових полімерів. *Наукові нотатки*, 2019. (68), 50-54.
13. Дінжос, Р. В., Лисенков, Е. А., & Фіалко, Н. М. Особливості теплопровідності композитів на основі термопластичних полімерів та частинок алюмінію, 2015. 3(7), 03022-1-03022-5.
14. Burger, N., Laachachi, A., Ferriol, M., Lutz, M., Toniazzi, V., & Ruch, D. Review of thermal conductivity in composites: Mechanisms, parameters and theory. *Progress in Polymer Science*, 2016. 61, 1-28.
15. Huang, X., Lin, Y., & Fang, G. Thermal properties of polyvinyl butyral/graphene composites as encapsulation materials for solar cells. *Solar Energy*, 2018. 161, 187-193.
16. Wang, D., Ren, S., Chen, J., Li, Y., Wang, Z., Xu, J., ... & Fu, J. Healable, highly thermal conductive, flexible polymer composite with excellent mechanical properties and multiple functionalities. *Chemical Engineering Journal*, 2022. 430, 133163.
17. Jing, X., Li, Y., Zhu, J., Chang, L., Maganti, S., Naik, N., ... & Guo, Z. Improving thermal conductivity of polyethylene/polypropylene by styrene-ethylene-propylene-styrene wrapping hexagonal boron nitride at the phase interface. *Advanced Composites and Hybrid Materials*, 2022. 5(2), 1090-1099.
18. Behera, A., & Behera, A. Additive Manufacturing Materials. *Advanced Materials: An Introduction to Modern Materials Science*, 2022. 667-700.
19. Zhang, Z., Gkartzou, E., Jestin, S., Semitekolos, D., Pappas, P. N., Li, X., ... & Dong, H. 3D printing processability of a thermally conductive compound based on carbon nanofiller-modified thermoplastic polyamide 12. *Polymers*, 2022. 14(3), 470.
20. Тепломасообмін: навч. посіб. Ч. 1. / уклад.: Н. М. Гавалешко; Чернів. нац. ун-т ім. Ю. Федьковича. – Чернівці: Рута, 2015. – 88 с.

References

1. Yao, F., You, G., Zeng, S., Lu, D., & Ming, Y. Reaction-tunable diffusion bonding to multilayered Cu mesh/ZK61 Mg foil composites with thermal conductivity and lightweight synergy. *Journal of Materials Science & Technology*, 2023. 139, 10-22.
2. Zhao, H., Zhang, W., Yin, X., Wu, Y., Du, C., Zhao, W., ... & Liu, C. Conductive polyurethane elastomer electrolyte (PUEE) materials for anodic bonding. *RSC advances*, 2020. 10(22), 13267-13276.
3. Olivera, A. F., Chica, E., & Colorado, H. A. Design and manufacturing with 3D printing and life cycle analysis of a recyclable polymer-based H-Darrieus wind turbine. *Engineered Science*, 2024. 31, 1156.
4. Li, T., Wei, H., Zhang, Y., Wan, T., Cui, D., Zhao, S., ... & Cheng, B. Sodium alginate reinforced polyacrylamide/xanthan gum double network ionic hydrogels for stress sensing and self-powered wearable device applications. *Carbohydrate Polymers*, 2023. 309, 120678.
5. Liu, X., Zhang, J., Zheng, C., Xue, J., Huang, T., Yin, Y., ... & Guiver, M. D. Oriented proton-conductive nano-sponge-facilitated polymer electrolyte membranes. *Energy & Environmental Science*, 2020. 13(1), 297-309.
6. Ruan, K., Guo, Y., & Gu, J. Liquid crystalline polyimide films with high intrinsic thermal

- conductivities and robust toughness. *Macromolecules*, 2021. 54(10), 4934-4944.
7. Kwon, Y. J., Kim, Y., Jeon, Y. P., Hong, J. Y., Park, H. S., & Lee, J. U. Thermally conducting yet electrically insulating epoxy nanocomposites containing aluminum electrochemically exfoliated graphene hybrid. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2022. 152, 106675.
 8. Ji, J., Chiang, S. W., Liu, M., Liang, X., Li, J., Gan, L., ... & Du, H. Enhanced thermal conductivity of alumina and carbon fibre filled composites by 3-D printing. *Thermochimica acta*, 2020. 690, 178649.
 9. Doshi, M., Mahale, A., Singh, S. K., & Deshmukh, S. Printing parameters and materials affecting mechanical properties of FDM-3D printed Parts: Perspective and prospects. *Materials Today: Proceedings*, 2022. 50, 2269-2275.
 10. Mamunya Y.P., Davydenko V.V., Pissis P., Lebedev E.V. Electrical and thermal conductivity of polymers filled with metal powders. *Eur Polym J*. 2002. Vol. 38. P. 1887-1897
 11. Zhong C., Yang Q., Wang W. Correlation and prediction of the thermal conductivity of amorphous polymers. *Fluid Phase Equilibria*. 2001. Vol. 181. P.195-202
 12. Kolupaiev B.B. Matematychnе modeliuвання teploprovodnosti liniinykh hnuchkolantsiuhovyykh polimeriv. *Mizhvuzivskyi zbirnyk "naukovi notatky" Lutsk*, 2019. (68), 50-54.
 13. Dinzhos, R. V., Lysenkov, E. A., & Fialko, N. M. Osob-lyvosti teploprovodnosti kompozytiv na osnovi termo-plastychnyykh polimeriv ta chastynok aljuminiju, 2015. 3(7), 03022-1-03022-5.
 14. Burger, N., Laachachi, A., Ferriol, M., Lutz, M., Toniazzi, V., & Ruch, D. Review of thermal conductivity in composites: Mechanisms, parameters and theory. *Progress in Polymer Science*, 2016. 61, 1-28.
 15. Huang, X., Lin, Y., & Fang, G. Thermal properties of polyvinyl butyral/graphene composites as encapsulation materials for solar cells. *Solar Energy*, 2018. 161, 187-193.
 16. Wang, D., Ren, S., Chen, J., Li, Y., Wang, Z., Xu, J., ... & Fu, J. Healable, highly thermal conductive, flexible polymer composite with excellent mechanical properties and multiple functionalities. *Chemical Engineering Journal*, 2022. 430, 133163.
 17. Jing, X., Li, Y., Zhu, J., Chang, L., Maganti, S., Naik, N., ... & Guo, Z. Improving thermal conductivity of polyethylene/polypropylene by styrene-ethylene-propylene-styrene wrapping hexagonal boron nitride at the phase interface. *Advanced Composites and Hybrid Materials*, 2022. 5(2), 1090-1099.
 18. Behera, A., & Behera, A. Additive Manufacturing Materials. *Advanced Materials: An Introduction to Modern Materials Science*, 2022. 667-700.
 19. Zhang, Z., Gkartzou, E., Jestin, S., Semitekolos, D., Pappas, P. N., Li, X., ... & Dong, H. 3D printing processability of a thermally conductive compound based on carbon nanofiller-modified thermoplastic polyamide 12. *Polymers*, 2022. 14(3), 470.
 20. Teplomasoobmin: navch. posib. Ch. 1. /uklad.: N. M. Ghavaleshko; Cherniv. nac. un-t im. Ju. Fedjkovycha. – Chernivci: Ruta, 2015. – 88 s.
- Pushkarov D.V., Sliptsov A. O., Sova N. V., Savchenko B. M. Additive technologies for creating thermal conductive polymer composites**
- The work investigated the influence of the composition of a polymer composite and its additive manufacturing parameters on the value of its thermal conductivity. As a polymer matrix for the research, a typical additive manufacturing, environmentally friendly and affordable polymer material - polylactide was used. Thermally conductive fillers of different nature - powdered copper and graphite, in different mass ratios, were introduced into the composite to increase thermal conductivity and provide the ability to control the thermal characteristics of the material. Composite materials were created by mixing the components in the melt on a twin-screw extruder. Additive manufacturing of experimental samples was carried out using the filament deposition molding technology. The material for additive manufacturing in the form of a filament was obtained from the composite material by extrusion. The samples were printed with the orientation of the layers parallel and perpendicular to the direction of the heat flow, which made it possible to assess the influence of the spatial arrangement of the material jets on the anisotropy of thermal conductivity.*
- Composite materials based on polylactide, obtained by the classical injection molding method and the additive manufacturing method, showed similar thermal conductivity values. The use of copper and graphite fillers allowed them to significantly increase the thermal conductivity of the material—by more than two times. The orientation of the layers and the location of the material jets relative to the direction of the heat flow have a significant impact on its thermal conductivity. It was found that the graphite filler is more effective compared to the copper one, since it provides a more significant increase in thermal conductivity even at a lower mass content. In addition, the effect of the orientation of the layers and the filler is more pronounced for graphite fillers. This approach may allow the development of lightweight, heat-dissipating polymer elements of housing for electronics, which have both functional and structural significance. The anisotropy of thermal conductivity, controlled by printing parameters, opens new opportunities for engineering design of complex products with optimized thermophysical characteristics.*
- Keywords:** *Keywords: polylactide, polymer composite materials, thermal conductive composites, additive technologies, graphite, copper.*

Пушкаръов Денис Вікторович – аспірант, Київський національний університет технологій та дизайну, факультет хімічних та біофармацевтичних технологій, кафедра хімічних технологій та ресурсозбереження, global23412@gmail.com

Слепцов Олександр Олегович – к.т.н., асистент, Київський національний університет технологій та дизайну, факультет хімічних та біофармацевтичних технологій, кафедра хімічних технологій та ресурсозбереження, slyepcov.oo@knutd.edu.ua

Сова Надія Володимирівна – д.т.н., професор, Київський національний університет технологій та дизайну, факультет хімічних та біофармацевтичних технологій, кафедра хімічних технологій та ресурсозбереження, djanc@ukr.net

Савченко Богдан Михайлович – д.т.н., професор, Київський національний університет технологій та дизайну, факультет хімічних та біофармацевтичних технологій, кафедра хімічних технологій та ресурсозбереження, 1079@ukr.net

Стаття подана 07.03.2025.

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-290-4-57-62>

УДК 666.943

ДО ПИТАННЯ ПРО СТВОРЕННЯ КОМПОЗИЦІЙНИХ КЕРАМІЧНИХ МАТЕРІАЛІВ

Лісачук Г.В., Баглай В.Ю.

ON THE ISSUE OF CREATING COMPOSITE CERAMIC MATERIALS

Lisachuk G.V., Baglay V.Yu.

У зв'язку з інтенсивним розвитком сучасних бездротових технологій зв'язку, а також постійним зростанням кількості електронних пристроїв, які функціонують у широкому частотному діапазоні, у навколишньому середовищі спостерігається сталий підвищення рівня штучного електромагнітного випромінювання. Це зумовлює поступове зростання електромагнітного фону, що створює потенційні ризики для безперебійної та надійної роботи високочутливої електронної апаратури, а також може чинити негативний вплив на здоров'я та загальний стан біологічних об'єктів, зокрема людей. У зв'язку з цим особливої актуальності набувають дослідження, спрямовані на створення нових ефективних матеріалів з високими електромагнітно-захисними властивостями, які також повинні характеризуватись задовільними експлуатаційними показниками. У даній роботі наведено результати експериментального дослідження процесу розроблення композиційної керамічної плитки, що містить у своєму складі електропровідні та сегнетоелектричні функціональні компоненти. Як електропровідну добавку використано карбід кремнію у кількості 30 мас. %, а як сегнетоелектричну – титанат стронцію, який вводили в кількості 10, 20 і 30 мас. %. Дослідна плитка має двошарову структуру: перший шар являє собою керамічну масу з 30 мас. % карбиду кремнію, другий шар – масу з відповідним вмістом титанату стронцію. Формування зразків здійснювалося методом напівсухого пресування, а випал проводили в силітовій печі за температур 1120–1140 °С з ізотермічною витримкою 20 хвилин. У процесі дослідження проаналізовано вплив зміни вмісту титанату стронцію на фізико-механічні характеристики виробів. Визначено основні експлуатаційні властивості зразків, такі як водопоглинання, пористість, уявна густина та межа міцності при згині. За результатами

досліджень визначено оптимальний склад композиційної кераміки, який забезпечує прийнятне поєднання експлуатаційних характеристик: водопоглинання – 6,84 %, пористість – 14,90 %, уявна густина – 2,16 г/см³, межа міцності при згині – 26,5 МПа. Встановлено, що зростання уявної густини може слугувати індикатором підвищення загальної щільності й потенційної міцності виробу, незважаючи на деяке збільшення пористості. Результати дослідження можуть бути використані при подальшій розробці керамічних матеріалів з функціональними властивостями для використання в умовах дії електромагнітного випромінювання.

Ключові слова: композиційна кераміка, двошарова плитка, карбід кремнію, титанат стронцію, напівсухе пресування, водопоглинання та пористість, уявна густина та межа міцності при згині.

Вступ. Усунення електромагнітного (ЕМ) забруднення та забезпечення захисту здоров'я людини, а також стабільної роботи електронного обладнання, є одним із пріоритетних напрямів у сфері розробки поглинаючих матеріалів. Зі стрімким розвитком бездротових комунікаційних технологій та зростанням кількості електронних пристроїв, що працюють у широкому спектрі частот, інтенсивність штучно створеного ЕМ-випромінювання невідносно зростає. Це призводить до посилення електромагнітного фону в навколишньому середовищі та зумовлює нові загрози як для функціонування високочутливих електронних систем, так і для біологічних об'єктів, зокрема організму людини [1,2].

Суттєвою проблемою сучасності є те, що джерела ЕМ-випромінювання часто діють в діапазоні частот від мегагерців (МГц) до гігагерців (ГГц), що значно ускладнює завдання ефективного екранування або поглинання. Традиційні поглинаючі матеріали, які були розроблені для обмежених частотних інтервалів, виявляються недостатньо ефективними для комплексного усунення такого багатоспектрового забруднення. З огляду на це, зростає актуальність створення інноваційних композитних матеріалів [3,4], здатних забезпечити високий рівень поглинання в широкому частотному діапазоні та водночас бути екологічно безпечними й економічно доцільними у виробництві.

Ефективність поглинання мікрохвильової енергії значною мірою визначається такими параметрами, як мікроструктурні особливості матеріалу, а також рівень діелектричних і магнітних втрат. Відповідно до теорії лінії передачі, ці втрати описуються через комплексну магнітну проникність ($\mu_r = \mu' - j\mu''$) та комплексну діелектричну проникність ($\epsilon_r = \epsilon' - j\epsilon''$), які характеризують відповідно здатність матеріалу до накопичення й дисипації енергії в магнітній та електричній складових електромагнітного поля. Таким чином, створення матеріалів із керованими діелектричними й магнітними властивостями, узгодженими з частотними характеристиками електромагнітного випромінювання та здатними охоплювати широкий частотний діапазон, мають вирішальне значення для розвитку сучасного матеріалознавства [5-7].

Перспективним напрямом наукових досліджень у сфері керамічних матеріалів є створення високоефективних композиційних систем на основі діелектричної керамічної матриці з введенням електропровідних функціональних добавок. Такий підхід дозволяє цілеспрямовано модифікувати структуру і властивості керамічних композитів з метою досягнення бажаних експлуатаційних характеристик. Зокрема, до складу ефективних електропровідних наповнювачів входять технічний вуглець, графіт, карбонільне залізо, карбід кремнію, титанати, оксид заліза (III), оксид міді (II) тощо [8-10].

У ряді досліджень [11,12] було продемонстровано доцільність використання карбіду кремнію як функціональної добавки для надання електропровідних властивостей композиційній кераміці, отриманій на основі шихти, призначеної для облицювальної плитки.

Зокрема, встановлено, що оптимальна концентрація карбіду кремнію становить близько 30% (мас.), оскільки саме за цієї умови забезпечується збереження значної частини добавки в первісному стані після випалу. Така стабільність фазового складу сприяє формуванню ефективного електропровідного каркасу в керамічній структурі, що, у свою чергу, забезпечує здатність матеріалу до екранування електромагнітного випромінювання. Отримані результати свідчать про перспективність подібних композитів для створення функціональної облицювальної кераміки з розширеними експлуатаційними властивостями.

Матеріали з перовскітною структурою (загальна формула ABO_3) є одними з найперспективніших функціональних оксидів, що активно застосовуються у сфері композитної кераміки. Їх особливість полягає у гнучкості кристалічної решітки, здатності до ізовалентного та неізовалентного легування, а також стабільності в умовах високих температур і агресивного середовища. Одними з найбільш вивчених представників є титанат барію ($BaTiO_3$) та титанат стронцію ($SrTiO_3$), які демонструють високу діелектричну проникність, п'єзоелектричні та фероелектричні властивості [13-16].

Інтегрування перовскітів у матрицю композиту дозволяє досягти синергії властивостей – наприклад, одночасного забезпечення електропровідності й механічної міцності. Дослідження показують, що при введенні частинок $SrTiO_3$ у керамічні матриці на основі Al_2O_3 або ZrO_2 відбувається покращення діелектричних властивостей без суттєвого зниження термостійкості [14].

В свою чергу, титанат стронцію є багатофункціональним матеріалом з широким спектром застосувань [17-20]. Його унікальні фізико-хімічні властивості, термостійкість та біосумісність, роблять його незамінним компонентом у створенні новітніх керамічних композицій. Як початковий сегнетоелектрик, $SrTiO_3$ завжди був важливим керамічним матеріалом, оскільки має відносно високу діелектричну проникність, низькі діелектричні втрати та помірну діелектричну пробивну міцність [19].

Метою роботи є створення композиційної керамічної плитки з додаванням карбіду кремнію та титанату стронцію, а також визначення впливу кількості добавки на фізико-механічні властивості кінцевого виробу.

Виклад основного матеріалу дослідження. Враховуючи вимоги до електропровідних добавок [21-23], які переважно використовують для отримання композиційних керамічних виробів, що мають захисні властивості від впливу електромагнітного випромінювання, в роботі для додавання в діелектричну матрицю було обрано як електропровідну добавку карбід кремнію (ТКЛР – $5 \cdot 7 \cdot 10^{-6}$ град-1, $T_{пл} = 2700$ °С) та як сегнетоелектрик титанат стронцію (ТКЛР – $9 \cdot 11 \cdot 10^{-6}$ град-1, $T_{пл} = 2080$ °С). Керамічну масу обирали, орієнтуючись на мінімальні показники температури та часу випалу, з урахуванням можливості окислення, вигорання або взаємодії добавки з діелектричною матрицею. Композиційну керамічну плитку отримували за технологічною схемою представленою на рис. 1.

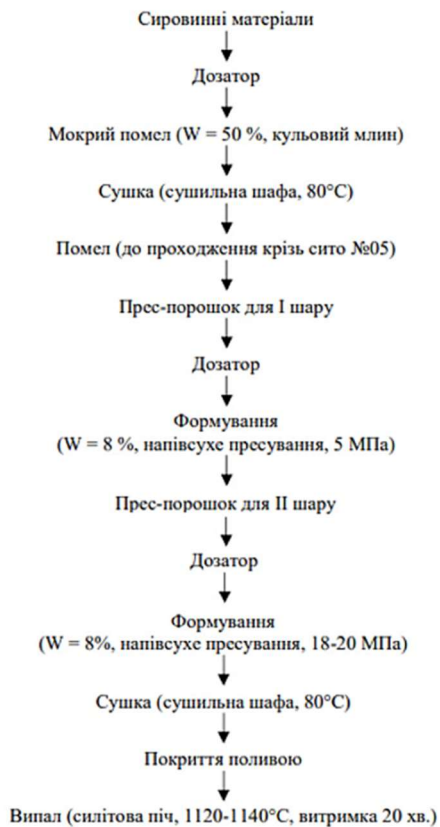


Рис. 1. Технологічна схема виготовлення композиційної керамічної плитки

Підготовка компонентів керамічної маси є критично важливим етапом технологічного процесу, що визначає якісні характеристики кінцевого виробу. Основна мета цього етапу полягає в забезпеченні відповідності кожного компоненту вимогам щодо хіміко-мінералогічного складу, ступеня чистоти, оптимальних фізико-механічних властивостей

та вологості, які є необхідними для ефективної подальшої обробки.

Первинне подрібнення сировини виконується з метою зменшення розміру частинок та досягнення необхідної дисперсності. У разі надмірної вологості матеріалу проводиться його сушіння до рівня, що забезпечує подальше ефективне подрібнення та зменшує ризик утворення агломератів. Завершальним етапом підготовки є попередня термообробка (випал), яка сприяє ініціації фазових перетворень у структурі матеріалу, підвищенню його щільності та видаленню летких сполук.

Комплексне виконання вищезазначених операцій дозволяє сформувати однорідну, стабільну за своїми властивостями керамічну масу, придатну для подальшого формування, сушіння та випалу, що у підсумку забезпечує отримання продукції високої якості з прогнозованими експлуатаційними характеристиками.

Дослідна композиційна керамічна плитка складається з двох шарів, розташування яких схематично наведено на рис. 2. В першому шарі в обрану керамічну масу вводили 30 мас. % карбиду кремнію, в другий шар як добавку вводили титанат стронцію в кількості 10, 20 та 30 мас. %.

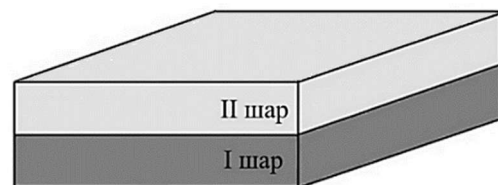


Рис. 2. Схематичне розташування шарів в плитці:
I шар з додаванням карбиду кремнію;
II шар з додаванням титанату стронцію

Шихтові склади для I та II шару керамічної плитки показано у табл.1. Прес-порошок замішували окремо, використовуючи необхідну кількість вихідної сировини. Компоненти зважували, зволожували, подрібнювали в шаровому млині, після чого отриманий шлікер висушували в сушильній шафі, подрібнювали та просіювали через сито №05.

На наступному етапі в підготовлений прес-порошок вводили добавки (карбід кремнію для першого шару, титанат стронцію для другого шару) в необхідній кількості та готову шихту доводили до вологості 8 %, після чого дозували та засипали у підготовлену прес-форму. Дослідні плитки отримували методом

напівсухого пресування на ручному гідравлічному пресі ПРГ-10.

Таблиця 1

Шихтові складові для композиційної керамічної плитки

Найменування сировинних матеріалів	Масовий вміст матеріалів, мас %			
	I шар	II шар		
		1	2	3
Глина Андріївська	29,93	37,31	33,62	29,93
Гранітні відсів	8,76	10,92	9,84	8,76
Крейда подрібнена	4,02	5	4,52	4,02
Пісок кварцовий	24,31	30,3	27,3	24,31
Плитковий бій	5,98	7,47	6,72	5,98
Карбід кремнію	27	-	-	-
Титанат стронцію	-	9	18	27

Для фіксації I шару відміряну необхідну масу шихти підпресовували прикладаючи тиск 5 МПа. Далі аналогічним способом працювали з II шаром: підготовлену та зволожену до 8 % вологості шихту відміряли, досипали в прес-форму до першого шару та пресували прикладаючи тиск 20 МПа. Отримані заготовки плитки розміщували у сушильну шафу та проводили дегідратацію до рівня вологості не більше 1 %. Завершальний етап передбачав випал у силітовій печі за температур 1120–1140 °C з ізотермічною витримкою протягом 20 хвилин.

Шифрування дослідних зразків містило наступну інформацію: зразки керамічної плитки з додаванням карбіду кремнію та титанату стронцію (КТ), перша цифра числової складової шифру вказує на кількість карбіду кремнію в керамічній масі («3» – 30 %), а друга – на кількість титанату стронцію в керамічній масі («1» – 10 %, «2» – 20 %, «3» – 30 %).

Показники структурно-фізичних характеристик дослідних плиток (водопоглинання, пористість, уявна густина) визначали способом їх гідростатичного зважування з використанням попереднього вакуумування та насичення водою згідно ДСТУ ISO 5017:2014. Механічні властивості зразків, а саме межі міцності при згині, визначали за допомогою триточкового методу згідно ДСТУ 3716-98. За кінцевий результат приймали середнє арифметичне значення трьох паралельних випробувань з округленням до 0,01 г/см³. Результати проведених досліджень наведено в табл. 2.

У результаті аналізу отриманих показників фізико-механічних властивостей чотирьох керамічних композицій (КК-30, КТ-31, КТ-32, КТ-33) було встановлено тенденцію до поступового зростання показників водопоглинання, пористості, уявної густини. Зокрема, водопоглинання зростає від 6,23 % до 6,92 %, пористість – від 13,65 % до 15,12 %, а уявна густина – від 2,11 до 2,18 г/см³. Таке зростання водопоглинання та пористості свідчить про підвищення відкритої пористості матеріалу, що потенційно може знижувати його морозостійкість, але разом з тим покращувати теплоізоляційні властивості. При цьому межа міцності при згині зростає з 17,2 МПа без додавання SrTiO₃ до 26,5 МПа при додаванні 20 мас.% SrTiO₃, та майже не змінюється при збільшенні концентрації SrTiO₃ до 30 мас.%.

Таблиця 2

Показники фізико-механічних властивостей дослідної композиційної плитки

Шифр композиції	Водопоглинання W , %	Пористість P , %	Уявна густина на ρ , г/см ³	Межа міцності при згині $\sigma_{зг}$, МПа
КК-30	6,23	13,65	2,11	17,2
КТ-31	6,71	14,51	2,14	23,8
КТ-32	6,84	14,90	2,16	26,5
КТ-33	6,92	15,12	2,18	26,4

Паралельне підвищення уявної густини попри збільшення пористості може вказувати на ущільнення матеріалу на мікрорівні або зміну мінералогічного складу, що забезпечує щільніше пакування частинок. Зростання уявної густини може бути позитивним фактором, що свідчить про підвищення загальної щільності та потенційної міцності, незважаючи на збільшення пористості. Композиція КК-30 має найнижчі значення водопоглинання та пористості, що робить її більш придатною для використання в умовах підвищеної вологості.

Згідно вимог ДСТУ Б В.2.7-282:2011 "Плитки керамічні. Технічні умови" отримані дослідні плитки за своїми показниками відносяться до групи ВІІ.

Висновки. За результатами проведених досліджень було отримано композиційну керамічну плитку з додаванням карбіду кремнію та титанату стронцію, що відповідає вимогам ДСТУ Б В.2.7-282:2011.

Встановлено, що збільшення концентрації сегнетоелектричної добавки SrTiO₃ від 10 до 30 мас.% призводить до поступового зростання показників водопоглинання (від 6,23 % до 6,92 %), пористості (від 13,65 % до 15,12 %) та уявної густини (від 2,11 до 2,18 г/см³). В свою чергу, межа міцності при згині зростає при підвищенні концентрації добавки до 20 мас.% та становить 26,5 МПа, тоді як при збільшенні кількості добавки до 30 мас.% зміни практично не відбуваються.

Встановлено, що зростання уявної густини призводить до підвищення загальної щільності та потенційної міцності дослідних зразків, незважаючи на збільшення пористості.

На основі проаналізованих даних, як оптимальний склад композиційної кераміки, обрано серію КТ-32, а саме: I шар – керамічна маса з додаванням 30 мас.% SiC, II шар – керамічна маса з додаванням 20 мас. % SrTiO₃, який має наступні властивості: водопоглинання – 6,84 %, пористість – 14,90 %, уявна густина – 2,16 г/см³, межа міцності при згині – 26,5 МПа.

Література

1. Sahu M., Behera S., Chattopadhyay B. The Influence of Electromagnetic Field Pollution on Human Health: A Systematic Review. *Siriraj Medical Journal*, 2021. 73(7), 485–492. <https://doi.org/10.33192/Smj.2021.63>
2. Green M., X. Chen Recent progress of nanomaterials for microwave absorption. *Journal of Materiomics*, 2019. 5(4), 503–541. <https://doi.org/10.1016/j.jmat.2019.07.003>
3. Dahl M., Liu Y., Yin Y. Composite Titanium Dioxide Nanomaterials. *Chemical Reviews*, 2014. 114(19), 9853–9889. <https://doi.org/10.1021/cr400634p>
4. Vovchenko L., Lozitsky O., Matzui L., Oliynyk V., Zagorodnii V., Skoryk M. Electromagnetic shielding properties of epoxy composites with hybrid filler nanocarbon/BaTiO₃. *Materials Chemistry and Physics*, 2020. 240(15), 122234. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2019.122234>
5. Joseph N., Singh S.K., Sirugudu R.K., Murthy V.R.K., Ananthakumar S., Sebastian M. T. Effect of silver incorporation into PVDF-barium titanate composites for EMI shielding applications. *Materials Research Bulletin*, 2013. 48(4), 1681–1687. <https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2012.11.115>
6. Matzui L.Yu., Vovchenko L.L., Yakovenko O.S., Turkov O.V., Zhuravkov O.V., Ischenko O.V., Diyuk V.E., Dyachenko A.G., Pryhunova O.V., Zagorodnii V.V., Cojocari M., Fedorov G., Kuzhir P. Microwave properties of composites based on glass microspheres coated with ferromagnetic compounds. *Journal of Materials Research and Technology*, 2025. 36, 7043–7054. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2025.04.283>
7. Navdeep S., Gagan D. Carbon Nanotubes based Composites for Electromagnetic Absorption - A Review. *Current Applied Materials*, 2022. 1(1), 18. <https://doi.org/10.2174/2666731201666210803110914>
8. Hryhoruk V.I., Oliynyk V.V., Zagorodnii V.V., Lisachuk G.V., Kryvobok R.V., Voloshchuk V.V., Maystat M.S., Lapuzina O.M. Study of the electrodynamic properties of composite ceramics. *Himia, Fizika ta Tehnologija Poverhni*, 2023. 14(2), 249–254. <https://doi.org/10.15407/hftp14.02.249>
9. Akman F., Kaçal M.R., Almousa N., Sayyed M.I., Polat H. Gamma-ray attenuation parameters for polymer composites reinforced with BaTiO₃ and CaWO₄ compounds. *Prog Nucl Energy*, 2020. 121, 103257. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2020.103257>
10. Grygoruk V.I., Oliynyk V.V., Zagorodnii V.V., Lisachuk G.V., Kryvobok R.V., Zakharov A.V., Voloshchuk V.V., Maistat M.S. Microwave Electrodynamic Characteristics of Ceramic Materials. *Journal of Nano- and Electronic Physics*, 2022. 14(1), 01016-1-01016-4. [https://doi.org/10.21272/jnep.14\(1\).01016](https://doi.org/10.21272/jnep.14(1).01016)
11. Lisachuk G. V., Sakhnenko N. D., Pitak Y. M., Krivobok R. V., Maystat M. S., Zakharov A. V., Voloshchuk V. V., Saray V. V. Creation of electrically conductive composite ceramics based on facing tiles with the addition of SiC. *Scientific Research on Refractories and Technical Ceramics*, 2021. 121, 121–128. <https://doi.org/10.35857/2663-3566.121.13>
12. Lisachuk G., Krivobok R., Zakharov A., Voloshchuk V., Maystat M., Sarai V. Technology of manufacture of radio absorption ceramics. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Innovation researches in students' scientific work*, 2021. 2(1362), 9–14. <https://doi.org/10.20998/2220-4784.2021.02.02>
13. Bhalla A., Guo R., Roy R. The perovskite structure – a review of its role in ceramic science and technology. *Mat Res Innovat*, 2000. 4, 3–26. <https://link.springer.com/article/10.1007/s100190000062>
14. Sun C., Zhou Y., Bai W., Xiao M., Feng K., Tong Y., Luo Z., Yang C. Study on the dielectric properties of SrTiO₃ ceramics by CuO/Al₂O₃ insulation. *Ceramics International*, 2025. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0272884225014075>
15. Singh M., Yadav B. C., Ranjan A., Kaur, M., Gupta, S.K. Synthesis and characterization of perovskite barium titanate thin film and its application as LPG sensor. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2016. 241, 1170–1178. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2016.10.018>
16. Lisachuk, G., Kryvobok, R., Zakharov, A., Voloshchuk, V., Maistat, M., Hlinskyi, D., Kolovorotnyi, B. (). Influence of the firing temperature on the dielectric properties of ceramics based on barium titanate. *Technology Audit and Production Reserves*, 2021.

5(3(61)), 10–13. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2021.242865>

17. Phoon B.L., Lai C.W., Juan J.C., Show P.-L., Chen W.-H. A review of synthesis and morphology of SrTiO₃ for energy and other applications. *Int J Energy Res*, 2019. 43(10), 5151-5174 <https://doi.org/10.1002/er.4505>

18. Stanciu C., Hau S., Stanciu G., Tihon C. Er, Yb-codoped SrTiO₃ ceramics: Synthesis, structural, microstructural and optical characterization. *Ceramics International*, 2025. 51(12(B)), 16771-16779. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2024.11.302>

19. Zhong B., Zuo C., Yang C., Yang S., Li Y., Yu H., Wei X. Bifunctional europium doped SrTiO₃ ceramics with energy storage and photoluminescence. *Journal of Alloys and Compounds*, 2022. 901, 163556. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.163556>

20. Chung T.-H., Kwok K.W. Low-temperature-sintered Pr-doped 0.93(Bi_{0.5}Na_{0.5})TiO₃-0.07BaTiO₃ multifunctional ceramics with Li₂CO₃ sintering aid. *Journal of Alloys and Compounds*, 2018. 737, 317-322. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.11.355>

21. Lisachuk G., Kryvobok R., Pitak Y., Lapuzina O., Gusarova I., Lisachuk L., Grebenyuk A. Ceramics with adjustable dielectric properties based on the system SrO – TiO₂ – SiO₂. *Przegląd Elektrotechniczny*, 2018. 94(1), 163-166. <https://doi.org/10.15199/48.2018.01.40>

22. Benavente R., Salvador M.D., Centeno A., Alonso B., Zurutuza A., Borrell A. Study of Microwave Heating Effect in the Behaviour of Graphene as Second Phase in Ceramic Composites. *Materials*, 2020. 13(5), 1119. <https://doi.org/10.3390/ma13051119>

23. Dhawan S.K., Ohlan A., Singh K. Designing of Nano Composites of Conducting Polymers for EMI Shielding. *Advances in Nanocomposites-Synthesis, Characterization and Industrial Applications*, 2011. 429. <https://doi.org/10.5772/14752>

Lisachuk G.V., Baglay V.Yu. On the issue of creating composite ceramic materials.

Due to the intensive development of modern wireless communication technologies, and the continuous increase in the number of electronic devices operating across a wide frequency range, there is a steady rise in artificial electromagnetic radiation in the surrounding environment. This leads to a gradual increase in the electromagnetic background, which creates potential risks for the uninterrupted and reliable operation of highly sensitive electronic equipment, and may also have a negative impact on the health and overall condition of biological objects, including

humans. Therefore, research aimed at creating new effective materials with high electromagnetic shielding properties, which should also exhibit satisfactory operational characteristics, becomes particularly relevant. This work presents the results of an experimental study on the development of a composite ceramic tile containing electrically conductive and ferroelectric functional components. Silicon carbide was used as the electrically conductive additive at 30 wt.%, while strontium titanate, a ferroelectric additive, was introduced in amounts of 10, 20, and 30 wt.%. The experimental tile has a two-layer structure: the first layer consists of a ceramic mass with 30 wt.% silicon carbide, and the second layer is a ceramic mass with the corresponding content of strontium titanate. The samples were formed by the semi-dry pressing method and fired in a silicate furnace at temperatures of 1120–1140 °C with an isothermal holding time of 20 minutes. The study analyzed the influence of varying strontium titanate content on the physical and mechanical properties of the samples. Key operational properties such as water absorption, porosity, apparent density, and flexural strength were determined. The optimal composite ceramic composition was identified, providing a balanced combination of performance characteristics: water absorption – 6.84%, porosity – 14.90%, apparent density – 2.16 g/cm³, and flexural strength – 26.5 MPa. It was established that an increase in apparent density can serve as an indicator of enhanced overall density and potential strength of the material, despite some increase in porosity. The results of this study can be used in further development of ceramic materials with functional properties suitable for applications under electromagnetic radiation exposure.

Keywords: composite ceramics, two-layer tile, silicon carbide, strontium titanate, semi-dry pressing, water absorption and porosity, apparent density and flexural strength.

Лісачук Георгій Вікторович – доктор технічних наук, професор Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут", lisachuk@kpi.kharkov.ua

Баглай Володимир Юрійович – аспірант Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут", volodymyr.bahlai@ihti.khpi.edu.ua

Стаття подана 03.04.2025.

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-290-4-63-71>

UDC [678.742:66.095.26]:661.183

CURRENT STATE OF THE ART IN POLYLACTIDE POLYMER WATER EMULSIONS DEVELOPMENT

Khlystun S.O., Myronyuk O.V.

ОСТАННІ ДОСЯГНЕННЯ У СТВОРЕННІ ВОДНИХ ЕМУЛЬСІЙ НА ОСНОВІ ПОЛІМЕРУ ПОЛІЛАКТИДУ

Хлистун С.О., Миронюк О.В.

The current trend towards green and sustainable development has prompted researchers and scientists to devote more and more of their time to studying and improving potential biopolymers as alternatives to traditional polymers. While renewable resource-based polymers are already widely used in medicine and packaging, they still need further research to meet certain requirements on par with conventional polymers for a wider range of applications.

Poly(lactic acid) (PLA) emulsions have gained significant attention in the coatings industry due to their biodegradability, sustainability, and potential to replace conventional solvent-based systems and fossil-based polymers. This study aims to provide a comprehensive overview of recent research and advancements in PLA emulsion preparation, focusing on fundamental properties of the emulsions, different synthesis methods, including solvent evaporation, emulsification-solvent diffusion, and high-pressure homogenization. The role of stabilizers and solvents in ensuring emulsion stability and performance is analyzed, and their ability to influence the final coating properties are analyzed. Widely used surfactants and bio-based stabilizers are highlighted.

Despite their advantages, PLA emulsions face key challenges such as hydrophobicity, phase separation, and limited mechanical properties, which hinder their broader industrial application. This review identifies these challenges and explores potential solutions, including the use of nanotechnology, bio-based stabilizers, and optimized processing techniques. Additionally, strategies for improving scalability, reducing the environmental impact of PLA emulsions and promising applications are discussed. By addressing these limitations, PLA-based coatings could become a viable alternative in the development of sustainable materials. The current literature remains largely fragmented, and this review aims to synthesize existing

findings into a structured, comparative analysis. In doing so, it lays the groundwork for future research and innovation in the field of environmentally friendly coating technologies.

Keywords: *poly(lactic acid); polymer; water dispersions; film formation.*

Introduction. The environmental impact of petroleum-based plastics has become a critical global concern, with plastic production exceeding 400 million tons per year and a significant portion ending up in landfills or the natural environment [1]. This massive accumulation contributes to pollution and greenhouse gas emissions, intensifying global warming and ecological degradation. In response, researchers and industries are increasingly turning to sustainable, biodegradable alternatives – particularly biopolymers such as poly(lactic acid) (PLA).

PLA is a bio-based, biodegradable polyester derived from renewable resources like corn starch or sugarcane [2]. Its advantages include high mechanical strength, biocompatibility, and reduced carbon footprint compared to conventional polymers. In recent years, interest has grown in adapting PLA for use in coatings – a field traditionally dominated by fossil-based resins. However, the utilization of PLA in coating applications is not without challenges. One significant limitation is its relatively low thermal stability, with a glass transition temperature around 60–65°C and a melting point between 130–180°C, which can restrict its use in high-temperature environments [3]. Additionally, PLA exhibits brittleness and limited elongation at break, leading

to concerns about its mechanical performance in flexible coating applications.

Another critical issue is PLA's hydrophobic nature, which poses challenges in achieving stable aqueous emulsions necessary for water-based coatings. Moreover, while PLA is biodegradable under industrial composting conditions, its degradation in natural environments is significantly slower, raising questions about its environmental impact [4, 5].

The problem statement. To address these challenges, researchers are exploring the preparation of PLA emulsions as a promising strategy to enable its use in coating formulations. Strategies include blending with other polymers, incorporating plasticizers, and developing novel emulsion techniques to improve its mechanical properties and processability. Emulsification not only allows the dispersion of PLA in aqueous media but also opens possibilities for tuning film properties such as flexibility, adhesion, and degradation rate. Emulsion-based PLA coatings are particularly attractive for applications in wood protection, packaging, and biomedical surfaces where biodegradability and environmental safety are paramount.

Despite the growing body of research, the majority of existing results are presented in the form of isolated experimental studies with limited cross-comparison or synthesis. These works often focus on specific formulations or techniques without providing broader conclusions about general trends, performance factors, or optimization strategies. Therefore, there is a clear need for a systematic review that organizes and analyzes these findings, identifies gaps in knowledge, and offers a cohesive understanding of the preparation methods, stabilization approaches, and application prospects for PLA emulsions.

The aim of the research. This review systematizes the strategies for preparing PLA emulsions suitable for coating applications, examining their formulation, stability, film-forming behavior, and potential environmental and functional advantages. To achieve the goal of this work, several key tasks were set and accomplished. First, the environmental motivation and scientific relevance of developing PLA-based emulsions as an alternative to petroleum-derived coatings are outlined. Next, the main approaches used to prepare polymer emulsions were described, focusing on physical methods and their relevance to biopolymer systems. Specific methods applied to PLA were reviewed, highlighting their mechanisms, advantages, and limitations. After that, key factors

affecting emulsion stability, such as droplet size, phase behavior, and interfacial phenomena, were investigated. The role of various emulsifiers in stabilizing PLA emulsions is analyzed and the most commonly used surfactants are reviewed. Additionally, critical barriers to the practical use of PLA emulsions in coatings were identified, including issues of materials, processes, and performance characteristics, and current and emerging uses of PLA emulsions in various industries were discussed, with a focus on coating technology.

Statement of the basic material of the study. Emulsion systems are commonly prepared using two principal categories of methods: high-energy and low-energy techniques [6]. Each method is distinguished by the way energy is introduced into the system to create and stabilize the dispersed phase.

General methods for preparing emulsions. High-energy methods utilize mechanical input to forcibly break one phase into fine droplets within another. Techniques such as high-shear mixing, ultrasonication, and high-pressure homogenization are effective tools to overcome interfacial tension, particularly when creating emulsions from hydrophobic polymers or pre-polymer solutions. These methods are suitable for forming small, uniform droplets and are often used when emulsifying organic solutions of polymers like PLA into aqueous phases.

In contrast, low-energy methods depend on changes in system composition or temperature to drive emulsification. Techniques such as emulsification by solvent diffusion and emulsification-evaporation are valuable approaches, especially when working with biodegradable or thermally sensitive polymers. These methods typically involve dissolving the polymer in a volatile or partially water-miscible organic solvent, followed by dispersion into water and removal of the solvent to form stable emulsions or particles.

Another noteworthy approach is condensation-based emulsification, where emulsion formation occurs concurrently with polymer growth, leading to enhanced stability and control over droplet architecture. This technique is relevant for systems requiring in-situ polymerization or step-growth polymer formation and supports the development of advanced emulsified structures for coatings and functional materials.

Due to the hydrophobic nature and solvent dependency of poly(lactic acid) (PLA), the preparation of its emulsions commonly relies on

both low-energy solvent-based techniques and high-energy mechanical dispersion. The choice of method depends on desired emulsion properties, application requirements, and formulation constraints.

Methods for preparing PLA emulsions. One of the most widely used techniques is the emulsification–evaporation method. PLA is dissolved in a volatile, water-immiscible organic solvent such as dichloromethane, and the resulting organic phase is emulsified into an aqueous phase containing a stabilizer like polyvinyl alcohol (PVA) using high-shear mixing or ultrasonication. As the organic solvent evaporates, typically under reduced pressure or ambient conditions, PLA precipitates into fine droplets suspended in water [7].

Advantages of this method include its simplicity, compatibility with hydrophobic drugs or additives, and good control over particle size. Limitations involve the use of toxic solvents and the need for effective solvent removal. It is widely applied in biomedical formulations and in coating systems where precise particle morphology is needed.

The emulsification–diffusion method uses a partially water-miscible solvent such as ethyl acetate, which diffuses into the continuous aqueous phase after emulsification and is then removed by evaporation [8]. This approach avoids chlorinated solvents and operates under milder conditions, making it more environmentally friendly. It is ideal for forming emulsions containing thermally sensitive components or bioactive molecules. However, solvent selection is limited, and slower solvent diffusion can result in broader particle size distributions.

Ultrasonication, often used to assist emulsification, employs high-frequency sound waves to generate cavitation, which breaks large droplets into smaller ones [9]. This method is highly effective in producing nano-sized emulsions with narrow particle distributions and requires minimal surfactant. It is especially suitable for applications needing high precision in droplet size, such as nanocoatings or PLA-based delivery systems. The main drawback is the limited scalability and potential for polymer degradation due to localized heating.

High-pressure homogenization involves forcing the emulsion through a narrow gap at high pressure, causing intense shear and turbulence that break down droplets to submicron sizes [10]. This method produces highly uniform emulsions and is scalable for industrial use. It is beneficial in continuous coating production or when long-term

emulsion stability is essential. However, the method is energy-intensive and may not be suitable for heat-sensitive compounds.

Each technique offers unique benefits depending on the formulation goals – whether it's enhanced stability, environmental safety, process scalability, or compatibility with sensitive additives in coating systems.

Emulsion stability. But after preparing the emulsion, it is necessary to ensure its stability. The stability of emulsions is a critical parameter for their practical use in coatings, pharmaceuticals, and food systems. Emulsion stability refers to the system's ability to resist changes in droplet size distribution and phase separation over time. Several physical phenomena can destabilize emulsions, including coalescence, flocculation, creaming/sedimentation, and Ostwald ripening [11].

Emulsion stability is influenced by several interrelated factors. (Fig. 1).

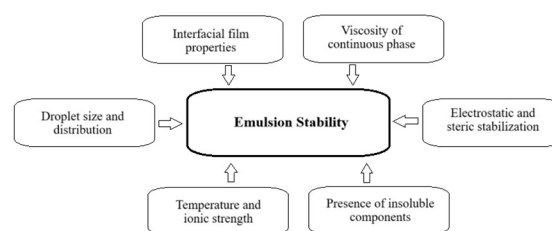


Fig. 1. Factors affecting emulsion stability

One of the primary considerations is droplet size and distribution: smaller droplets tend to resist gravitational separation and coalescence more effectively, while a narrow size distribution enhances uniformity and minimizes the likelihood of phase separation. The properties of the interfacial film also play a critical role; the strength and elasticity of the stabilizing layer formed at the oil/water interface – usually by surfactants or polymers – are key to preventing droplet coalescence. Additionally, the viscosity of the continuous phase, typically aqueous, significantly affects droplet mobility; increased viscosity reduces the rate of creaming and lowers the frequency of droplet collisions. Electrostatic and steric stabilization mechanisms are also important. Surfactants may impart charges to droplets, causing electrostatic repulsion, while adsorbed polymer layers can create steric hindrance that physically blocks droplet aggregation. Environmental factors such as temperature and ionic strength further impact stability. Higher temperatures tend to lower the rigidity of the interfacial film and enhance

droplet motion, thereby promoting instability. Likewise, high ionic strength can compress the electric double layer around droplets, weakening electrostatic stabilization. Finally, the presence of insoluble components like pigments or crystalline particles can influence the rheological behavior of the emulsion. These additives may stabilize the system through Pickering stabilization or, conversely, cause destabilization through bridging flocculation, depending on their nature and interactions within the emulsion.

Designing stable emulsions requires a balance of interfacial engineering, viscosity modification, and environmental control to suppress the mechanisms of destabilization.

Emulsifiers used in PLA-based emulsions. Emulsifiers play a critical role in the stabilization of emulsions by reducing interfacial tension between immiscible phases and forming protective layers around dispersed droplets. Emulsifiers can be broadly categorized by their molecular structure and mechanism of action, including low molecular weight surfactants, polymeric stabilizers, and naturally derived compounds [12]. Among these, nonionic surfactants such as Tween 20, Tween 80, and Span 60 (Fig. 2) are widely used in emulsion systems due to their mildness, compatibility with a wide pH range, and low toxicity. These surfactants are particularly effective in stabilizing emulsions through steric hindrance and have demonstrated high efficiency in preparing PLA-based emulsions. Tween 80, for example, has been frequently applied in PLA nanoemulsion formulations, ensuring droplet stabilization and suppressing aggregation [13].

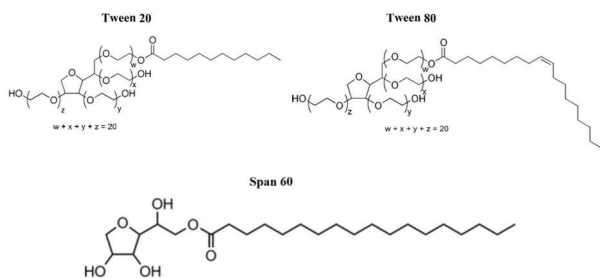


Fig. 2. Chemical structure of Tween 20, Tween 80, Span 60

Ionic surfactants such as sodium dodecyl sulfate (SDS) and cetyltrimethylammonium bromide (CTAB) (Fig. 3) also serve as effective emulsifiers by imparting electrostatic repulsion among droplets [14]. SDS, in particular, has been used in various PLA emulsion formulations, although its sensitivity to changes in pH and ionic

strength can limit its applicability in certain coating systems [15]. In contrast, polymeric emulsifiers such as polyvinyl alcohol (PVA) provide enhanced stability through the formation of robust interfacial films. PVA is one of the most commonly used stabilizers in PLA emulsion preparation due to its excellent film-forming ability and strong steric stabilization, making it suitable for applications requiring long-term dispersion stability. A number of scientific papers support its widespread use in PLA emulsions intended for controlled release systems and coatings [16].

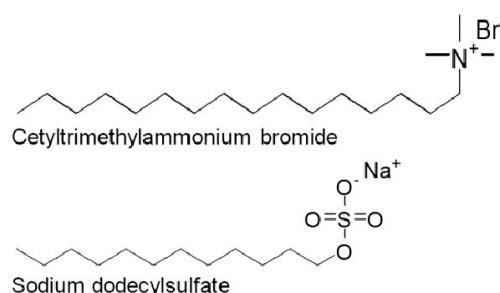


Fig. 3. Chemical structure of cetyltrimethylammonium bromide (CTAB) and sodium dodecyl sulfate (SDS)

Another class of polymeric stabilizers includes poloxamers, such as Pluronic F68 (Fig. 4), which are amphiphilic block copolymers offering both steric and, in some cases, thermoresponsive stabilization. These have been explored in PLA nanoparticle dispersions for biomedical and environmentally friendly coating applications [17]. Natural emulsifiers such as lecithin, gum arabic, and casein have also been investigated for stabilizing emulsions, particularly where biocompatibility and biodegradability are essential. Lecithin, a phospholipid-based emulsifier, has shown promise in PLA systems but often provides weaker interfacial strength compared to synthetic polymeric emulsifiers.

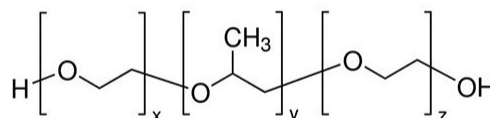


Fig 4. Chemical structure of Pluronic F68

Overall, the choice of emulsifier for PLA emulsion preparation depends on the required stability, particle size distribution, biocompatibility, and application context. Among the available options, polyvinyl alcohol and nonionic surfactants like Tween 80 remain the most suitable and widely

adopted stabilizers for preparing PLA emulsions intended for coating formulations.

Challenges and limitations. While poly(lactic acid) (PLA) is an attractive candidate for developing sustainable coatings due to its biodegradability and renewable origin, several limitations continue to hinder its broader application, especially in emulsion-based systems.

One of the primary challenges lies in PLA's intrinsic brittleness and low toughness, which results in coatings with poor flexibility and resistance to mechanical stress. This restricts the standalone use of PLA in structural or load-bearing applications, unless modified through blending or plasticization [18]. However, such modifications can reduce environmental compatibility or lead to phase separation within emulsified systems.

Another significant barrier is PLA's limited thermal and hydrolytic stability. The polymer begins to degrade at elevated temperatures and is sensitive to hydrolysis under humid or aqueous conditions, which complicates its use in water-based emulsions. This property affects the long-term durability of coatings and can lead to instability during processing, storage, or application.

In aqueous systems, PLA's hydrophobic nature presents an additional formulation challenge. Achieving a stable and uniform dispersion in water often requires careful selection of surfactants or co-solvents, and even then, issues such as droplet coalescence or sedimentation can arise. This makes the design of long-term stable PLA emulsions technically demanding and often reliant on trial-and-error stabilization strategies.

Moreover, PLA exhibits slow crystallization kinetics, which can lead to poor film formation, delayed curing, or inconsistent adhesion on substrates. This limitation is particularly relevant for coating applications that demand fast setting times or require specific surface interactions. Techniques such as nucleating agents or copolymerization have been explored, though they add complexity and may affect the clarity or biodegradability of the final product [19].

Finally, economic constraints remain a consideration. The production cost of high-purity PLA is still higher than that of conventional petrochemical-derived polymers, especially in regions without local biopolymer infrastructure. This limits PLA's competitiveness in price-sensitive markets, despite its ecological advantages.

These challenges illustrate the importance of continued material innovation and formulation

optimization to unlock the full potential of PLA emulsions in coatings and related fields.

Potential applications. Poly(lactic acid) (PLA) emulsions offer promising applications across various industries due to their biodegradability, biocompatibility, and eco-friendly profile. In the field of coatings, PLA emulsions can be used for environmentally sustainable surface finishes on a wide range of substrates, including wood, paper, textiles, and metals. These coatings offer not only durability and water resistance but also the advantage of biodegradability upon disposal, making them ideal for applications where environmental impact is a key concern.

In the pharmaceutical and biomedical industries, PLA emulsions are utilized for controlled drug release systems. The polymer's biocompatibility and ability to form stable emulsions allow for the encapsulation of active compounds in a manner that facilitates sustained release over time [20]. Additionally, PLA emulsions are used in cosmetic formulations, particularly in skin-care products, due to their non-toxic nature and the ability to form smooth, uniform coatings on the skin [21].

PLA emulsions are also finding growing use in food packaging and agricultural films, where their biodegradability provides a sustainable alternative to traditional plastic films. Their ability to form thin, protective layers that degrade naturally offers a promising solution for reducing plastic waste.

As research and development in PLA-based emulsions advance, their applications are expected to expand into new areas such as electronic devices, where they can be used as coatings for environmentally friendly, biodegradable electronics.

Recent findings and further development of technology. Recent advancements in the field of poly(lactic acid) (PLA) emulsions have underscored their significant potential in diverse applications, including coatings, biomedical devices, food packaging, and environmental solutions. However, the development of stable and efficient PLA emulsions continues to face challenges, particularly in terms of thermal sensitivity, brittleness, hydrophobicity, and limited mechanical properties. As researchers continue to explore the full potential of PLA, it is evident that overcoming these limitations is critical for broadening its commercial viability and performance.

One promising strategy to address these limitations involves incorporating nanofillers and surface-active agents to enhance mechanical, thermal, and barrier properties of PLA emulsions.

Recently, scientists have been carefully considering the possibilities of modifying PLA with various nanofillers, such as nanoclays, carbon nanotubes, and cellulose-based materials [22]. These modifications can significantly improve PLA's stiffness, heat resistance, and overall performance, and such strategies can be effectively transferred to emulsified systems to improve film properties after application.

Additionally, investigating eco-friendly stabilizing agents, such as bio-based surfactants or polysaccharides, could improve emulsion stability without compromising biodegradability. The use of PEG-PLA-PEG block copolymer surfactants has shown to enhance the water compatibility and stability of PLA emulsions, which is especially valuable for applications in high-solid, waterborne coating systems [23]. These amphiphilic surfactants contribute to improved dispersion and emulsion shelf-life, while maintaining the biodegradability and environmental friendliness of the system.

Moreover, recent findings emphasized the importance of modifying PLA through blending and composite strategies to improve its mechanical and thermal properties, which is crucial for the performance of PLA emulsions in demanding applications [24]. The combination of PLA with nanofillers and bio-based surfactants has shown promise in enhancing the strength, flexibility, and overall durability of the emulsions, making them more suitable for industrial use.

As the field progresses, further research into the optimization of PLA emulsions is essential to unlock their full potential across a wide range of applications. Key directions for future development include the design and use of more efficient and environmentally friendly surfactants, particularly those derived from renewable or biodegradable sources, which can replace conventional synthetic emulsifiers and reduce ecological impact. Additionally, advances in polymer modification – such as copolymerization, surface grafting, or functionalization with reactive groups – offer opportunities to enhance the stability, mechanical properties, and interfacial compatibility of PLA-based emulsions. The integration of nanotechnology, for example through the incorporation of nanoscale fillers or active agents, also presents promising avenues for creating multifunctional PLA coatings with antimicrobial, barrier, or self-healing properties.

Moreover, adapting formulation strategies to meet specific industrial demands – such as improving film-forming ability, water resistance, or adhesion to different substrates – will expand the

usability of PLA emulsions in sectors like packaging, biomedical coatings, agriculture, and wood protection. To support commercial implementation, scalable and energy-efficient production methods must also be refined, including the use of continuous processing technologies and real-time emulsion monitoring systems.

With continued interdisciplinary innovation, PLA emulsions could evolve from niche research products into widely adopted alternatives to petroleum-based coatings. Their potential to reduce the environmental footprint of polymer-based materials makes them a critical component in the transition toward a circular, bio-based economy and the broader goal of sustainable materials science.

Conclusions. This review provides a systematic examination of polylactic acid (PLA) emulsions as a sustainable alternative to petroleum-derived coating materials. Through an in-depth analysis of the current literature and technical developments, the study highlights the significant potential of PLA emulsions while also acknowledging the complex challenges that remain. The main objective – to assess the state of the art in PLA emulsion preparation, stabilization, and application – has been fulfilled by addressing several interrelated research tasks that collectively offer a structured perspective on this promising but still-developing area.

Environmental motivations behind the shift from petroleum-based polymers to biodegradable alternatives such as PLA were established. The growing global plastic waste crisis and increasing legislative pressure for eco-friendly materials underscore the urgency of finding sustainable coating solutions. PLA stands out due to its biodegradability, biocompatibility, and origin from renewable resources, yet its direct use in coating applications is limited by factors such as brittleness and hydrophobicity – hence the need for emulsion-based strategies.

It was provided a foundation by discussing the general physical approaches employed to create emulsions, including high-shear mixing, ultrasonication, high-pressure homogenization, and condensation methods. These techniques are essential for controlling droplet size and stability, which are critical for the performance of polymer emulsions. Understanding these basic methods helped contextualize their suitability and adaptability for biopolymers like PLA.

The specific application of general techniques preparing emulsions to PLA systems was explored. Methods such as emulsification-evaporation, emulsification-diffusion, ultrasonication and high-

pressure were examined in terms of their mechanisms, processing conditions, and resulting particle characteristics. Each approach offers trade-offs in terms of particle size control, process complexity, and compatibility with encapsulated actives or additives. These insights are essential for selecting appropriate methods tailored to specific end-use requirements in coatings.

It was highlighted the multifactorial nature of emulsion stability and analyzed how factors such as droplet size, viscosity of the continuous phase, interfacial film strength, and external conditions (e.g., temperature and ionic strength) influence the physical and thermodynamic stability of PLA emulsions. Understanding these variables is key to formulating stable systems with consistent performance, particularly in demanding application environments like coatings.

A variety of surfactants and stabilizing agents that have been used in the recent studies, such as Tween 20, Span 60, SDS, and lecithin were identified and evaluated. It was discussed their roles in reducing interfacial tension and providing electrostatic or steric stabilization. The suitability of each emulsifier depends on system pH, ionic strength, and desired release or degradation profiles. This analysis also pointed to the growing interest in developing bio-based and biodegradable emulsifiers compatible with PLA.

The main barriers to the widespread adoption of PLA emulsions in coatings were reviewed. These include PLA's inherent hydrophobicity, limited water dispersibility, sensitivity to thermal degradation, and difficulties in achieving long-term emulsion stability. Technical constraints in processing methods and limitations in film-forming behavior were also discussed. Overcoming these barriers will require innovation in material design, surfactant chemistry, and processing technologies.

Lastly, current and emerging uses of PLA emulsions, particularly in coating technologies were outlined. PLA emulsions have shown promise in areas such as biodegradable packaging films, controlled-release systems in agriculture and pharmaceuticals, and environmentally benign wood and paper coatings. The ability to tailor emulsion properties opens the door for a wide array of functional coatings that align with circular economy principles.

Overall, while many advancements have been made, existing results are predominantly experimental and fragmented. This review demonstrates a clear need for further systematization and investigation to identify optimal formulations, scalable production

techniques, and application-specific performance benchmarks. Continued interdisciplinary collaboration will be essential to transition PLA emulsions from laboratory research to viable industrial solutions that contribute meaningfully to sustainability goals.

This research was funded by Ministry of Education and Science of Ukraine, agreement number PH/53-2024 (26.09.2024) (European Union aid instrument for fulfilling Ukraine's obligations in the Framework Program of the European Union for Scientific Research and Innovation "Horizon 2020).

Л і т е р а т у р а

1. Ritchie H., Roser M. Plastic pollution / H. Ritchie, M. Roser // *Our World in Data*. 2018. <https://ourworldindata.org/plastic-pollution>.
2. Poly(Lactic acid) / ed. by R. Auras et al. Hoboken, NJ, USA : John Wiley & Sons, Inc., 2010. URL: <https://doi.org/10.1002/9780470649848>.
3. Farah S., Anderson D. G., Langer R. Physical and mechanical properties of PLA, and their functions in widespread applications – A comprehensive review. *Advanced drug delivery reviews*. 2016. Vol. 107. P. 367–392. URL: <https://doi.org/10.1016/j.addr.2016.06.012>.
4. Recent advances in biodegradable polymers for sustainable applications / A. Samir et al. *Npj materials degradation*. 2022. Vol. 6, no. 1. P. 1–28. URL: <https://doi.org/10.1038/s41529-022-00277-7>.
5. Plastics of the future? The impact of biodegradable polymers on the environment and on society / T. P. Haider et al. *Angewandte chemie international edition*. 2019. Vol. 58, no. 1. P. 50–62. URL: <https://doi.org/10.1002/anie.201805766>.
6. Bararnia H. Synthesizing emulsions via condensation : PhD thesis in Mechanical Engineering / H. Bararnia. University of Illinois at Chicago, 2021. 221 p., URL: https://indigo.uic.edu/articles/thesis/Synthesizing_Emulsions_via_Condensation/15270372/1/files/29252910.pdf
7. Rheological response of polylactic acid dispersions in water with xanthan gum / S. Buoso et al. *ACS omega*. 2022. Vol. 7, no. 15. P. 12536–12548. URL: <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c05382>.
8. Uniform-sized PLA nanoparticles: preparation by premix membrane emulsification / Q. Wei et al. *International journal of pharmaceutics*. 2008. Vol. 359, no. 1-2. P. 294–297. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2008.03.027>
9. Shetgaonkar G. G., Kumar L. Ultrasound-Activated nanoparticles. *Emerging technologies for nanoparticle manufacturing* / ed. by J. K. Patel, Y. V. Pathak. Cham, 2021. P. 301–332. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-030-50703-9_13.
10. Preparation of nanoemulsions by high-energy and lowenergy emulsification methods / H. Jasmina et al. *Cmbebih 2017* / ed. by A. Badnjevic. Singapore,

2017. Vol. 62. P. 317–322. URL: https://doi.org/10.1007/978-981-10-4166-2_48.
11. McClements D. J. Critical review of techniques and methodologies for characterization of emulsion stability. *Critical reviews in food science and nutrition*. 2007. Vol. 47, no. 7. P. 611–649. URL: <https://doi.org/10.1080/10408390701289292>.
 12. Emulsions and emulsifiers / K. Sarathchandraprakash et al., *Asian J. Exp. Chem.*, vol. 8, no. 1&2, pp. 30–45, 2013.
 13. Influence of stabilizing agents and preparative variables on the formation of poly(D,L-lactic acid) nanoparticles by an emulsification-diffusion technique / D. Quintanar-Guerrero et al. *International journal of pharmaceuticals*. 1996. Vol. 143, no. 2. P. 133–141. URL: [https://doi.org/10.1016/s0378-5173\(96\)04697-2](https://doi.org/10.1016/s0378-5173(96)04697-2).
 14. Interfacial and thermodynamic approach of surfactants with α -chymotrypsin and trypsin: a comparative study / R. Banjare et al., *Indian journal of chemistry section a*. 2020.
 15. Sizing down and functionalizing polylactide (PLA) resin for synthesis of PLA-based polyurethanes for use in biomedical applications / B. Nim et al. *Scientific reports*. 2023. Vol. 13, no. 1. P. 2284. URL: <https://doi.org/10.1038/s41598-023-29496-x>.
 16. Preparations of poly(lactic acid) dispersions in water for coating applications / G. Belletti et al. *Polymers*. 2021. Vol. 13, no. 16. P. 2767. URL: <https://doi.org/10.3390/polym13162767>.
 17. Astete C., Sabliov C. Synthesis and characterization of PLGA nanoparticles. *Journal of biomaterials science. Polymer edition*. 2006. Vol. 17. P. 247–89. URL: <https://doi.org/10.1163/156856206775997322>
 18. Jem K. J., Tan B. The development and challenges of poly (lactic acid) and poly (glycolic acid). *Advanced industrial and engineering polymer research*. 2020. Vol. 3, no. 2. P. 60–70. URL: <https://doi.org/10.1016/j.aiepr.2020.01.002>
 19. The development of poly(lactic acid) (PLA)-based blends and modification strategies: methods of improving key properties towards technical applications—review / J. Andrzejewski et al. *Materials*. 2024. Vol. 17, no. 18. P. 4556. URL: <https://doi.org/10.3390/ma17184556>.
 20. Lassalle V., Ferreira M. L. PLA nano- and microparticles for drug delivery: an overview of the methods of preparation. *Macromolecular bioscience*. 2007. Vol. 7, no. 6. P. 767–783. URL: <https://doi.org/10.1002/mabi.200700022>
 21. Biswal T. Recent progress in PLA-based composite and their application to biomedical and cosmetic fields. *Biopolymers in pharmaceutical and food applications* / ed. by S. Jana. 2024. P. 497–530. URL: <https://doi.org/10.1002/9783527848133.ch23>
 22. Recent advances in the investigation of poly(lactic acid) (PLA) nanocomposites: incorporation of various nanofillers and their properties and applications / N. D. Bikiaris et al. *Polymers*. 2023. Vol. 15, no. 5. P. 1196. URL: <https://doi.org/10.3390/polym15051196>.
 23. Preparation of high-solid PLA waterborne dispersions with PEG-PLA-PEG block copolymer as surfactant and their use as hydrophobic coating on paper / M. Calosi et al. *Progress in organic coatings*. 2024. Vol. 193. P. 108541. URL: <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2024.108541>.
 24. Enhancing polylactic acid (PLA) performance: A review of additives in fused deposition modelling (FDM) filaments / I. Plamadiala et al. *Polymers*. 2025. Vol. 17, no. 2. P. 191. URL: <https://doi.org/10.3390/polym17020191>.

Хлисту́н С.О., Миронюк О.В. Останні досягнення у створенні водних емульсій на основі полілактиду

Сучасна тенденція до екологічного та сталого розвитку спонукає дослідників і науковців все більше приділяти уваги вивченню та вдосконаленню потенційних біополімерів як альтернативи традиційним полімерним матеріалам. Хоча полімери на основі відновлюваної сировини вже широко застосовуються в медицині та пакуванні, вони все ще потребують подальших досліджень для досягнення характеристик, порівнянних із традиційними полімерними системами, з метою розширення сфер їх застосування. Емульсії на основі полі(молочної кислоти) (PLA) привертають значну увагу у лакофарбовій промисловості завдяки своїй біорозкладності, сталості та потенціалу заміни традиційних систем на основі розчинників і полімерів з викопної сировини. У цьому огляді представлено всебічний аналіз сучасних досліджень і досягнень у галузі підготовки емульсій PLA з акцентом на фундаментальні властивості емульсій та різні методи синтезу, зокрема випаровування розчинника, емульгування з дифузєю та гомогенізацію під високим тиском. Проаналізовано роль стабілізаторів і розчинників у забезпеченні стабільності емульсій і їхнього впливу на кінцеві властивості покриттів. Особливо розглянуто широко вживані ПАР та біосновні стабілізатори.

Попри численні переваги, емульсії PLA мають низку викликів, зокрема гідрофобність, фазове розширення та обмежені механічні характеристики, що стримує їхнє широке промислове застосування. У цьому огляді ідентифіковано основні проблеми та розглянуто потенційні шляхи їх подолання, включаючи використання нанотехнологій, біосновних стабілізаторів і оптимізованих технологій обробки. Також обговорюються стратегії покращення масштабованості, зменшення екологічного впливу емульсій PLA та перспективні напрями застосування. Оскільки наявні дослідницькі результати здебільшого представлені у вигляді окремих експериментальних робіт, цей огляд має на меті систематизувати накопичену інформацію у

вигляді структурованого та порівняльного аналізу. Таким чином, він закладає підґрунтя для подальших досліджень і впроваджень у сфері екологічно безпечних покривних матеріалів.

Ключові слова: *полі(молочна кислота); полімер; водні дисперсії; плівкоутворення.*

Хлисту́н Сергі́й Олегович – аспірант кафедри хімічної технології композиційних матеріалів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», s.khlystun@kpi.ua

Миронюк Олексій Володимирович – д.т.н., доцент, в.о. завідувача кафедри хімічної технології композиційних матеріалів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», o.myronyuk@kpi.ua

Стаття подана 15.04.2025.

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-290-4-72-77>

UDC 681.5.015

STUDY OF THE IMPACT OF DISCRETE CONTROL OF THE COOLING AND CONDENSATION UNIT ON THE EFFICIENCY OF AMMONIA PRODUCTION

Duryshch O. A., Kobzarev E. V., Gurin O.M., Loria M.G.

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ДИСКРЕТНОГО УПРАВЛІННЯ ВУЗЛОМ ОХОЛОДЖЕННЯ ТА КОНДЕНСАЦІЇ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ ВИРОБНИЦТВА АМІАКУ

Дуришев О.А., Кобзарев Є. В., Гурін О. М., Лорія М.Г.

Optimisation of the ammonia synthesis process is about determining the most efficient parameters and operating conditions to achieve the desired goals or maximise productivity under limited resources and external factors.

Key areas where optimisation is critical for ammonia synthesis include

Rational use of resources - optimisation reduces the consumption of energy, raw materials and chemicals, which helps to reduce production costs and increase the efficiency of secondary resources.

Improved product quality - optimisation ensures consistent production of high quality ammonia, which is critical for its further use.

Improved process safety - optimal operating conditions contribute to a safe production environment, minimising the risk of accidents, fires and explosions.

Stability of equipment operation - optimisation reduces parameter fluctuations, which has a positive impact on process reliability and end product quality.

Reduced overall costs - optimisation can minimise the cost of equipment operation, energy consumption and maintenance.

Optimisation is an important tool for improving the efficiency, productivity and sustainability of the ammonia production process.

This article discusses the application of a discrete-time control system with a mathematical model of an air-cooled apparatus (ACA) and analyses the economic feasibility of implementing this system.

The analysis allows us to determine whether approximate solutions are acceptable for practical use or whether there is a need to apply more accurate methods of solving the problem.

The first step was to choose the optimal degree of discretisation, which allowed, on the one hand, to accurately take into account minor changes in values,

and, on the other hand, to avoid an excessive increase in the number of possible states, which complicates calculations, especially when working with complex mathematical models. It has been established that the economic efficiency of the proposed discrete control system with a model of a cooling and condensation unit with a degree of discreteness of 0.5, since it allows to obtain up to UAH 2.7 million per year due to electricity savings;

Keywords: air cooling apparatus, mathematical model, parameter optimisation, discrete control system, economic efficiency.

Introduction. Stability issues in the ammonia synthesis process are caused by a mismatch between the operation of the automatic cooling and condensation (ACC) process and the dynamics of the synthesis itself. Process parameters, such as reagent consumption, inlet temperatures of the cooling unit and external temperature, vary for various reasons, including changes in the formulation or production conditions.

These changes can lead to fluctuations in the synthesis temperature regime and, as a result, in the temperature of the gas mixture at the column outlet and inlet to the APU. Operators may attempt to compensate for these changes by intervening and adjusting the ventilation of the APU. However, such interventions can lead to sudden changes in pressure and reagent flow rates, disrupting the stability of the ammonia synthesis process.

The problem is exacerbated when the ventilation is switched on haphazardly, leading to a sharp drop in temperature. This leads to an increase

in pressure in the heat exchanger group, further increasing the pressure drop between the synthesis column and the compressor. This, in turn, increases the consumption of reagents and can provoke uncontrollable changes in the ammonia synthesis cycle.

In addition, irrational energy consumption can lead to significant financial costs for the company. For example, if the equipment is operating at excess capacity, this will result in overpayments for electricity. Electricity bills can account for a significant share of total production costs, so effective management of electricity consumption is an important economic objective.

In addition to financial aspects, irrational electricity consumption can also have a negative impact on the environment. Excessive energy consumption leads to emissions of pollutants into the air and water, which can cause environmental pollution and affect air quality. In addition, electricity generation can cause greenhouse gas emissions, contributing to global warming and climate change.

Statement of the problem. The task of implementing a discrete control system is to eliminate instability and (conduct an efficient process?) energy efficiency of the technological process of ammonia synthesis. The lack of consistency in the operation of the automatic cooling and condensation process (ACP) leads to fluctuations in process parameters, which can lead to increased energy consumption and reduced efficiency. Additionally, inappropriate blower activation can cause sudden changes in the pressure and flow rate of the target component, which can discoordinate the synthesis process.

Purpose. The purpose of this paper is to study the feasibility of implementing a discrete control system with a model of an ammonia cooling and condensation unit in terms of economic efficiency and ensuring the required product outlet temperature.

The developed discrete control system is based on a mathematical model of the cooling and condensation unit, which accounts for interdependencies among process parameters and responds dynamically to changes in heat transfer conditions. The system determines optimal operating modes for fans and cooling parameters to maintain a stable gas temperature at the outlet of the synthesis column and ensure efficient heat exchange in the air-cooled heat exchanger (ACHE).

$$\tau'' \cdot \frac{d^2 y_1}{dt^2} + \tau' \cdot \frac{dy_1}{dt} + y_1 = K_1 \cdot (\tau_2 \frac{dz_1}{dt} + K_6 \cdot z_1) + K_3 \cdot (\tau_2 \frac{dz_3}{dt} + z_3) + K_7 \cdot z_4 \quad (1)$$

Taking into account the MM coefficients, the APO is as follows:

1) with the fan off:

$$3.76 \cdot \frac{d^2 y_1}{dt^2} + 1927 \cdot \frac{dy_1}{dt} + y_1 = 0.63 \cdot (-7979 \cdot \frac{dz_1}{dt} + z_1) + 0.27 \cdot (1909 \cdot \frac{dz_3}{dt} + z_3) + 0.45 \cdot z_4 \quad (2)$$

2) when the fan is on:

$$1.37 \cdot \frac{d^2 y_1}{dt^2} + 7.16 \cdot \frac{dy_1}{dt} + y_1 = -1.45 \cdot (12.71 \cdot \frac{dz_1}{dt} + z_1) + 0.27 \cdot (6.97 \cdot \frac{dz_3}{dt} + z_3) + 1.88 \cdot z_4 \quad (3)$$

3) when the irrigation system is on:

$$0.19 \cdot \frac{d^2 y_1}{dt^2} + 1.16 \cdot \frac{dy_1}{dt} + y_1 = -2.47 \cdot (1.03 \cdot \frac{dz_1}{dt} + z_1) + 0.27 \cdot (0.96 \cdot \frac{dz_3}{dt} + z_3) + 2.59 \cdot z_4 \quad (4)$$

Discretization in Control System Design.

One of the key aspects in implementing a discrete control system is the selection of an appropriate discretization level. The discretization level defines how finely a continuous variable or domain is partitioned into discrete units. A smaller discretization step allows for more accurate representation of subtle variations in the process variables.

However, decreasing the discretization interval increases the number of possible states or combinations within the model, which can significantly raise computational complexity—especially when dealing with sophisticated mathematical models. Thus, choosing the optimal discretization level involves a trade-off between model accuracy and computational efficiency. It is crucial to balance the need for precise representation of physical phenomena with the constraints of data processing and resource consumption.

In particular, reducing the temperature measurement discretization step may hinder the system's ability to detect minor fluctuations. If the discretization step approaches the absolute measurement error of the temperature sensor (0.5°C

in this case), most small variations in temperature may be perceived as noise rather than actual process changes.

To address this, incorporating temperature readings from the inlet of the cooling unit can enhance the system's ability to forecast changes in thermal conditions in response to variations in target component flow rate. The control algorithm can then dynamically adjust the operation of the fans at each air-cooled heat exchanger (ACHE) based on these input values, ensuring optimal cooling and condensation regimes for the gas mixture.

This approach helps prevent uncontrolled temperature spikes, pressure surges, and disturbances that commonly occur with manual fan operation. Instead, the system dynamically responds to changes in flow rate and continuously adapts the operation of the ACHEs to maintain process stability within the ammonia synthesis loop.

Impact of Contamination as a Disturbance in Discrete Control of the Cooling and Condensation Unit.

Considering contamination as a disturbance variable in the automated control scheme of the cooling and condensation unit, the application of a discrete control system offers the potential for more precise and efficient process regulation. This can lead to improved performance and the maintenance of optimal operating conditions.

The fundamental principle of a discrete control system lies in operating within a finite set of predefined states or modes. By transitioning between these states in response to contamination levels and other process variables, the system can effectively optimize the functioning of the cooling and condensation unit.

One practical approach to discrete control is to adjust the operating modes of fans and other cooling elements based on the measured degree of contamination. As contamination increases, the control system can automatically increase fan speed or modify cooling parameters to sustain optimal heat transfer efficiency.

Furthermore, the discrete control system can be enhanced with decision-making logic algorithms that take contamination levels and other relevant parameters into account. This enables the system to autonomously implement optimal control actions to ensure effective and stable operation of the cooling and condensation processes.

Monitoring and Control of Fouling in Air-Cooled Heat Exchangers Using a Discrete Control System

To monitor the fouling level of air-cooled heat exchangers (ACHEs), various sensors can be

deployed on the heat exchanger surfaces and other components within the system. These sensors track parameters indicative of surface contamination, enabling the control system to respond in a timely manner and initiate corrective actions.

The proposed discrete control system, integrated with a mathematical model of the cooling and condensation unit, enables the estimation of the fouling coefficient of ACHE surfaces by continuously monitoring and analyzing key heat transfer parameters and the system's response to contamination.

The system includes sensors for measuring temperature, pressure, and heat flux, among others. The collected data are transmitted to the cooling and condensation unit's model, which employs logical operators and analytical algorithms to process and interpret the information.

Based on this data analysis, the system can detect changes in heat transfer performance and assess the degree of fouling on the surfaces of heat exchangers and other ACHE components. For example, a decline in thermal efficiency may indicate the onset of surface fouling.

Using historical operational data or predefined threshold values, the system can approximate the current fouling coefficient by comparing real-time parameters against expected baseline values. This estimation supports proactive control measures.

By considering different combinations of fan activation and cooling settings, the discrete control system can implement optimal operational modes to maintain effective heat transfer and mitigate the adverse effects of fouling. This ensures the stable performance of the cooling and condensation processes and enhances the overall efficiency of the ammonia synthesis loop.

Energy Efficiency and Decision-Making in Discrete Control of the Cooling and Condensation Unit.

The proposed discrete control system not only enables the detection of fouling levels but also facilitates decision-making to optimize heat transfer performance and ensure efficient operation of the cooling and condensation unit.

When the estimated fouling coefficient reaches its maximum allowable threshold, the system triggers the self-cleaning mechanism of the air-cooled heat exchanger (ACHE). In parallel, an important objective of the control strategy is the minimization of energy consumption. Since the fans are activated only when necessary to compensate for temperature deviations, energy usage can be optimized, significantly reducing the operating costs of the ammonia synthesis process.

The economic feasibility of using a discrete control system for an air-cooling apparatus (ACA) is considered in detail

The following assumptions were used to calculate the economic feasibility:

1. Power of one fan $N = 100$ kW (according to the regulations).

2. Electricity cost $C = 4.06$ UAH per 1 kW (average value in Ukraine for enterprises).

3. The duration of the unit's operation in the warm season, $H = 5000$ hours/year (specified in the text).

4. Number of possible fan combinations, $K = 256$ (as discussed earlier).

To simplify the calculations, let us assume that the average difference in power consumption between fan combinations is $5/6 N$ (equal to approximately 83.33 kW).

Let's first determine the cost of electricity for each possible combination:

1. The cost of electricity for each combination, C_C , is the cost of electricity per 1 kW multiplied by the power of the combination:

$$C_C = C \cdot P_C \quad (18)$$

We choose the combination that has the lowest power consumption among those that meet the temperature requirements (as described in Section 3).

Next, calculate the difference in power consumption between the standard operating mode and the selected combination.

Multiply the difference in power consumption by the number of hours of operation per year (in your case, 5000 hours) and the cost of electricity per 1 kWh (4.06 UAH).

Analysis of the data shows that among the combinations that give a given value of the temperature at the outlet of the APO ± 1 °C in terms of energy efficiency is combination 248, i.e. we have achieved the maximum possible efficiency of electricity use for this process.

We have found a saving in the cost of electricity per hour when using the optimal combination compared to other combinations that give the set temperature at the outlet of the APO.

The minimum savings per hour are:

$$1082.7 - 947.3 = 135.4 \text{ UAH.}$$

The maximum savings per hour are:

$$1488.7 - 947.3 = 541.4 \text{ UAH.}$$

Accordingly, the minimum savings per year are:

$$135.4 \cdot 5000 = 677,000 \text{ UAH.}$$

The maximum savings for the year is:

$$541.4 \cdot 5000 = \text{UAH } 2,707,000.$$

Conclusion. The analysis of the discrete control system incorporating a model of the cooling and condensation unit under varying temperature conditions has demonstrated its significant potential in enhancing both energy efficiency and operational stability in ammonia production processes.

The proposed control strategy, employing a discretization step of 0.5, has been shown to achieve substantial economic benefits—yielding annual electricity savings of up to 2.7 million UAH. This result highlights the cost-effectiveness of the system and its practical value in reducing energy consumption without compromising process quality.

In addition to energy savings, the system addresses the critical issue of fouling on heat exchange surfaces within the air-cooled heat exchangers (ACHE). By monitoring the fouling coefficient, the system is capable of activating the self-cleaning mechanism once the critical threshold is reached—without the need to interrupt the synthesis stage. This feature enables in-process cleaning, which further minimizes energy losses and improves the efficiency of gas–ammonia mixture cooling and condensation.

Overall, the integration of a discrete control system with a model-based approach for the ammonia cooling and condensation unit significantly enhances equipment performance, reduces electricity consumption, and increases the overall stability and reliability of the ammonia synthesis process.

Література

1. О.В. Засядьвовк, А.В. Писаренко Синтез екстремальних систем керування ISSN 1811-4512. ElectronComm 2014, Vol. 19, №3(80) <https://mail.ukr.net/desktop#readmsg/16919466141416568376/f0>
2. Method for on-line identification of a first order plus dead-time process model, Electronic Letters, 31(15), 1297–1298. <https://doi.org/10.1049/el:19950865>
3. Verhaegen M. Filtering and System Identification: A Least Squares Approach. 2 nd ed. / M. Verhaegen, V. Verdult. Cambridge University Press, 2012. 422p. https://books.google.com.ua/books/about/Filtering_and_System_Identification.html?id=v1OUuAAACAAJ&redir_esc=y
4. Soderstrom T. Instrumental variable methods for system identification // Circuits, Systems and Signal Processing / T. Soderstrom, P. Stoica. 2002. Vol. 21, Issue 1. Pp. 1–9. <https://link.springer.com/article/10.1007/BF01211647>
5. Абдалхамид Д. Разработка комбинированной модели для задач оптимизации / Д. Абдалхамид,

- М.Г. Лорія, П.И. Елисеєв, А.Б. Целищев // Наука и техника (международный научно-технический журнал): Минск БНТУ, 2014.-№3.-С.209-213. https://sat.bntu.by/jour/article/view/64?locale=ru_RU
6. Loria M. Experimental investigation of the method of determination of optimal controller settings / M. Loria // EURIKA: Physics and Engineering. 2019. № 2. P. 16–22. <https://journal.eu-jr.eu/engineering/article/view/864>
 7. Maryna Loria, Principles and stages of creation of automatic control systems with a model of complex technological processes / Olexii Tselishchev, Petro Eliseyev, Olga Porkuian, Oleksandr Hurin, Alla Abramova, Sergii Boichenko // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies 2022- DOI: 10.15587/1729-4061.2022.270519
 8. Driankov, D. Palm R. Advances in Fuzzy Control [Text] / D.Driankov, R.Palm // Physica-Verlag. Heidelberg. Germany. 1988. P. 129-137.
 9. Лорія М. Г. Знаходження шляхів забезпечення максимальної ефективності роботи колони синтезу метанолу / М. Г. Лорія // Вісник Донбаської державної металургійної академії. – 2019. №2. С. 43- 50.

References

1. O.V. Zasiadvovk, A.V. Pysarenko Syntez ekstremalnykh system keruvannia ISSN 1811-4512. ElectronComm 2014, Vol. 19, №3(80) <https://mail.ukr.net/desktop#readmsg/16919466141416568376/f0>
2. Method for on–line identification of a first order plus dead–time process model, Electronic Letters, 31(15), 1297–1298. <https://doi.org/10.1049/el:19950865>
3. Verhaegen M. Filtering and System Identification: A Least Squares Approach. 2 nd ed. / M. Verhaegen, V. Verdult. Cambridge University Press, 2012. 422p. https://books.google.com.ua/books/about/Filtering_and_System_Identification.html?id=v1OUuAAACA AJ&redir_esc=y
4. Soderstrom T. Instrumental variable methods for system identification // Circuits, Systems and Signal Processing / T. Soderstrom, P. Stoica. 2002. Vol. 21, Issue 1. Pp. 1-9. <https://link.springer.com/article/10.1007/BF01211647>
5. Abdalkhamyd D. Razrabotka kombynyrovannoi modely dlia zadach optymyzatsyy / D. Abdalkhamyd, M.H. Loryia, P.Y. Elyseev, A.B. Tselyshchev // Nauka y tekhnika (mezhdunarodnyi nauchno-tekhnicheskyy zhurnal): Mynsk BNTU, 2014.-№3.-S.209-213. https://sat.bntu.by/jour/article/view/64?locale=ru_RU
6. Loria M. Experimental investigation of the method of determination of optimal controller settings / M. Loria // EURIKA: Physics and Engineering. 2019. № 2. R. 16–22. <https://journal.eu-jr.eu/engineering/article/view/864>

7. Maryna Loria, Principles and stages of creation of automatic control systems with a model of complex technological processes / Olexii Tselishchev, Petro Eliseyev, Olga Porkuian, Oleksandr Hurin, Alla Abramova, Sergii Boichenko // Eastern-European Journal of Enter-prise Technologies 2022- DOI: 10.15587/1729-4061.2022.270519
8. Driankov, D. Palm R. Advances in Fuzzy Control [Text] / D.Driankov, R.Palm // Physica-Verlag. Heidelberg. Germany - 1988. P. 129-137.
9. Loria M. H. Znakhodzhennia shliakhiv zabezpechennia maksimalnoi efektyvnosti roboty kolony syntezu metanolu / M. H. Loria // Visnyk Donbaskoi derzhavnoi metalurhiinoi akademii. – 2019. №2. S. 43-50.

Дуришев О.А., Кобзарев Є. В., Гурін О.М., Лорія М.Г. Дослідження впливу дискретного управління вузлом охолодження та конденсації на ефективність виробництва аміаку

Оптимізація процесу синтезу аміаку полягає у визначенні найбільш ефективних параметрів і умов роботи для досягнення поставлених цілей або максимізації продуктивності в умовах обмежених ресурсів і зовнішніх факторів.

Основні аспекти, в яких оптимізація має вирішальне значення для синтезу аміаку, включають Раціональне використання ресурсів - оптимізація зменшує споживання енергії, сировини та хімічних речовин, що сприяє зниженню виробничих витрат і підвищенню ефективності використання вторинних ресурсів.

Покращення якості продукції - оптимізація забезпечує стабільне виробництво аміаку високої якості, що є критично важливим для його подальшого використання.

Підвищення безпеки процесу - оптимальні умови експлуатації сприяють створенню безпечного виробничого середовища, мінімізуючи ризик нещасних випадків, пожеж та вибухів.

Стабільність роботи обладнання - оптимізація зменшує коливання параметрів, що позитивно впливає на надійність процесу та якість кінцевого продукту.

Зниження загальних витрат - оптимізація може мінімізувати витрати на експлуатацію обладнання, споживання енергії та технічне обслуговування.

Оптимізація є важливим інструментом підвищення ефективності, продуктивності та сталості процесу виробництва аміаку.

У цій статті розглянуто застосування системи дискретного керування з математичною моделлю апарата повітряного охолодження (АПО) та проаналізовано економічну доцільність впровадження цієї системи.

В результаті аналізу можна визначити, чи прийнятні наближені розв'язки для практичного

використання, чи є необхідність застосування більш точних методів розв'язання задачі.

Першим кроком був вибір оптимального ступеня дискретизації, який дозволив, з одного боку, точно врахувати незначні зміни величин, а з іншого - уникнути надмірного збільшення кількості можливих станів, що ускладнює розрахунки, особливо при роботі зі складними математичними моделями. Встановлено, що економічна ефективність запропонованої дискретної системи керування з моделлю вузлом охолодження та конденсації зі ступенем дискретності 0,5, адже за рахунок економії електричної енергії вона дозволяє отримати до 2,7 млн. грн/рік;

Ключові слова: апарат повітряного охолодження, математична модель, оптимізація параметрів, дискретна система керування, економічна ефективність.

Дуришев Олександр Андрійович – аспірант кафедри комп'ютерно-інтегрованих систем управління, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, duryshev@snu.edu.ua

Кобзарев Євген Володимирович – аспірант, асистент кафедри комп'ютерно-інтегрованих систем управління, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, kobzarev@snu.edu.ua

Гурін Олександр Миколайович – аспірант кафедри комп'ютерно-інтегрованих систем управління, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, gurin@ukr.net

Лорія Марина Геннадіївна – д.т.н., професор, завідувач кафедри комп'ютерно-інтегрованих систем управління, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, m_loria@snu.edu.ua

Стаття подана 25.04.2025.

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-290-4-78-82>

УДК631.319

ПІДВИЩЕННЯ РІВНЯ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ МОЖЛИВОСТЕЙ ПОСІВНОЇ МАШИНИ З ДИСКОВИМИ СОШНИКАМИ

Мелконов Г.Л., Фесенко Г.В., Курлов В.І.

IMPROVING THE FUNCTIONAL CAPABILITIES OF THE SEEDER WITH DISC COULDERS

Melkonov H.L., Fesenko H.V., Kurlov V.I.

Підвищення врожайності сільськогосподарських культур тісно пов'язано із створенням належних умов для проростання насіння при формуванні посівних борозенок робочими органами посівних машин. Особливо це відноситься до посівних машин із дисковими сошниками, які поряд із їх перевагами допускають формування борозенок із значним засміченням рослинними рештками їх посівного ложе. Причиною цього, як виявилось, є те, що диски сошників, перекочуючись по ґрунту, своєю натискною дією на рослинні рештки, при недостатньому опорі зі сторони ґрунту, не зможуть перерізати їх, тому переміщують їх у дно борозенок і залишають їх у насінневому ложі. Для висіяного насіння в такі борозенки не створюються належні умови для їх проростання, що в кінцевому результаті призводить до зниження врожайності сільськогосподарських культур. Підвищити різальну ефективність дисків можливо за рахунок надання їм обертового руху із проковзуванням, що потребує при розрізанні рослинних решток зменшеного тиску на них. В результаті цього розрізання дисками рослинних решток відбувається в приповерхневому шарі ґрунту, що упереджує їх переміщення до посівного ложе борозенок. Пошуковими дослідженнями виявлена посівна машина, диски сошників яких розрізають рослинні рештки з проковзуванням за рахунок того, що вали дисків кожного сошника з'єднані між собою шарнірним механізмом, а їх протилежні торці з'єднані із зовнішніми торцями валів сусідніх сошників шарнірними валами, які кінематично зв'язані з опорно-привідними колесами посівної машини. Разом з цим, привід дисків сошників і висівного апарату під час посіву може суттєво збільшити навантаження на опорно-привідні колеса посівної машини, що спричинить їх надмірне проковзування, внаслідок чого порушиться стабільність обертального руху

привідних механізмів. Установлено, що забезпечити стабільність обертального руху привідних механізмів посівної машини можна упередженням надмірного проковзування її опорно-привідних коліс за рахунок зрівноваження підвищеної обертальної сили на їх привідному валу. Такою є запропонована посівна машина, в склад якої входить енергетично забезпечений врівноважувач, який за умов надмірного проковзування опорно-привідних коліс, зрівноважує підвищену обертову силу на їх привідному валу, забезпечуючи тим самим стабільність роботи висівного апарату і обертового руху дисків сошників із проковзуванням під час посіву сільськогосподарських культур.

Ключові слова: машина, посів, борозенки, посівне ложе, проковзування, диск.

Вступ. Базовою основою сільськогосподарської галузі нашої держави є зернове господарство, яке має першочергове значення у забезпеченні продовольством населення, а промисловості сировиною, що створює сприятливі умови для подальшого розвитку рослинницької галузі, тісно пов'язаної з передовими технологічними процесами вирощування сільськогосподарських культур. При цьому технологія посіву займає одне із провідних місць, від показників виконання якої в значній мірі залежить врожайність висіяної культури. Для посіву зернових та інших культур, в сільськогосподарському виробництві застосовують вітчизняні посівні машини такі як СЗ-3,6А-04 та СЗ-5,4-04, СЗ-10,8, МВЗ-4,5 «Меланія», СЗМ, Ніка-6, СЗД-360.03-V, СРЗ 4-02 Mini-Till та інші, а також зарубіжні, такі як

Maschio Gaspardo Corona, Cataya, NTA 3510 Great Plains, TDNG 420 SEMEATO та інші, які обладнують дисковими, килевидними, анкерними та іншими типами сошників, серед яких машини з дисковими сошниками займають особливе місце [1]. Під час роботи таких посівних машин обертовий рух від їх опорно-привідних коліс передається висівним апаратам, які відбирають посівний матеріал із бункера і подають його через насіннепроводи до сошників, які загортають їх в ґрунт. У відповідності із агротехнічними вимогами до посіву зернових культур, сошники при заортанні насіння в ґрунт повинні формувати борозенки заданої глибини без рослинних решток, розміщувати насіння на ущільненому посівному ложі із забезпеченням їх контакту з капілярним шаром ґрунту і прикривати його вологим ґрунтом [2].

Метою роботи є дослідження сучасного стану посіву зернових та інших культур машинами із дисковими сошниками і підвищення рівня їх функціональних можливостей.

Задача дослідження: дослідити технологічний процес формування борозенок дисковими сошниками при посіві зернових культур, переважно на полі з поверхневими рослинними рештками.

Аналітичними дослідженнями встановлено, що при посіві зернових культур в сучасних системах землеробства, в тому числі в системі «нульового» обробітку ґрунту, знаходять широке застосування посівні машини із дисковими сошниками, які наділені особливою властивістю пристосовуватись до різноманітних польових умов сівби. При цьому встановлено, що при застосуванні таких машин для посівних робіт на полі з підвищеним вмістом поверхневих рослинних решток, диски сошників, натискуючи при перекочуванні на рослинні рештки, при достатньому опорі зі сторони ґрунту розрізають їх рублячим способом, який потребує значного зусилля [3]. При недостатньому опорі рослинним решткам зі сторони ґрунту, відбувається їх вдавлення дисками у дно борозенок, засмічуючи їх насінневе ложе [4]., Переміщенні дисками сошників рослинні рештки в насінневе ложе борозенок, погіршують умови проростання висіяного в них насіння, а також пригнічують їх подальший ріст і розвиток, що призводить до зниження врожайності сільськогосподарських культур [5].

Підвищити рівень функціональних можливостей посівної машини можливо наданням дискам сошників обертального руху із

проковзуванням, який оцінюється коефіцієнтом ковзання, δ .

$$\delta = \frac{V_{\delta}}{V_{\kappa}}, \quad (1)$$

де V_{δ} - швидкість проковзування дисків сошників посівної машини, м/с;

V_{κ} - швидкість дисків з проковзуванням відносно контакту з ґрунтом, м/с;

$$V_{\kappa} = \omega \cdot r_{\kappa}, \quad (2)$$

де ω - кутова швидкість диска, с⁻¹;

r_{κ} - радіус диска, м.

Дослідженнями також встановлено, що рух дисків з проковзуванням сприяє розрізанню ними поверхневих рослинних решток із меншим значенням нормального тиску на них. Внаслідок цього розрізання такими дисками рослинних решток відбувається у приповерхневому шарі ґрунту, що упереджує їх переміщення у дно борозенок і засмічення їх посівного ложі [6]. Разом з цим, із ковзанням дисків тісно пов'язано їх взаємодія з ґрунтом, яку можна оцінити коефіцієнтом зчеплення φ :

$$\varphi = \frac{R_{x \max}}{R_x}, \quad (3)$$

де R_x - реакція, що виникає в контактні диска з ґрунтом, Н.

$R_{x \max}$ - значення реакції, яке реалізується за умови максимального зчеплення диска з ґрунтом, Н;

Значення реакції R_x в значній мірі залежить від величини обертової сили, яка утворюється на валу дисків сошників при їх приводі від опорних коліс посівної машини. При цьому, необхідною умовою переміщення дисків із проковзуванням є узгодженість їх обертового руху із обертами опорно-привідних коліс, яка реалізується кінематичним зв'язком їх привідного валу з обертовими валами дисків сошників посівної машини. Разом з цим, привід механізмів посівної машини від опорних коліс підвищує на них навантаження, спричинюючи тим самим їх переміщення з проковзуванням, коефіцієнт ковзання якого, може виходити за межі допустимого 0,1 [7]. Внаслідок цього порушується стабільність роботи привідних механізмів, до яких відноситься висівний апарат посівної машини [8].

Подальшими пошуковими дослідженнями виявлена посівна машина, диски сошників яких проковзують під час розрізання рослинних решток, що забезпечує формування ними борозенок із незасміченим посівним ложе [9]. При цьому вали дисків кожного сошника з'єднані між собою шарнірним механізмом, а їх протилежні торці з'єднані із зовнішніми торцями валів сусідніх сошників шарнірними валами, які кінематично зв'язані з опорно-привідними колесами машини таким чином, що колова швидкість коліс значно перевищує колову швидкість дисків сошників. Структурний аналіз такої посівної машини показав, що привід дисків сошників і висівного апарату під час посіву суттєво збільшує навантаження на опорно-привідні колеса, що підвищує їх коефіцієнт ковзання, значення якого може перевищити допустиме. Внаслідок цього порушується стабільність обертального руху приводу висівного апарату і дисків сошників, що погіршує умови формування ними борозенок

із незасміченим посівним ложе і висів у них насіння із заданим рядковим розподілом. Дослідженнями також встановлено, що підвищити рівень функціональних можливостей посівної машини можна упередженням надмірного проковзування її опорно-привідних коліс за рахунок зрівноваження на їх валу надмірної колової сили. Такою можливістю наділена посівна машина, в склад якої входить рама 1 з опорно-привідними колесами 2, вал 3 з датчиком 4 силового зусилля на валу 3 зернотуковий ящик 5 з висівним апаратом 6, зернотукопроводи 7, підпружинені повідки 8 з віссю 9 їх провороту, сошники 10 з дисками 11 на обертових валах 12, з'єднаних між собою сферичним шарнірним механізмом 13, шарнірні вали 14 із компенсатором 15 зміни їх довжини, регулятор 16 трансформації обертів, врівноважувач 17 з енергетичним забезпеченням, ланцюгові передачі 18, 19, 20 і 21 (рис.).

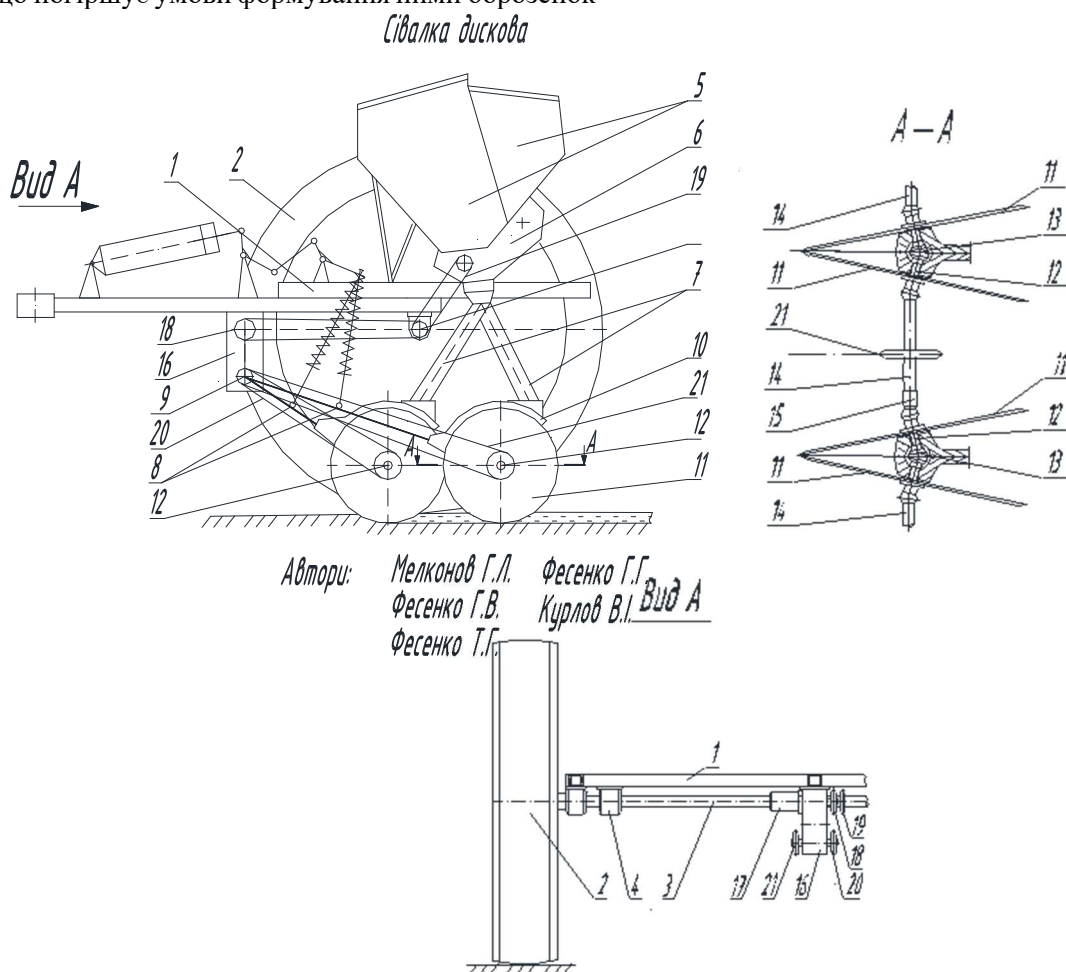


Рис. Машина посівна:

1 – рама; 2 – колеса; 3 – вал; 4 – датчик; 5 – ящик зернотуковий; 6 – апарат висівний; 7 – зернотукопроводи; 8 – повідки; 9 – вісь; 10 – сошники; 11 – диски; 12 – вал обертовий; 13 – механізм шарнірний; 14 – вал шарнірний; 15 – компенсатор; 16 – регулятор; 17 – врівноважувач; 18, 19, 20 і 21 – передачі ланцюгові

Під час сівби такою машиною, колеса 2 своїм валом 3 передають обертальний рух через передачу 18 до висівного апарату 6, а передачами 20 і 21 через вали 14 з компенсатором 15 валам 12, які через механізм 13 передають обертальний рух дискам 11 таким чином, що вони перекочуються по ґрунту із значним проковзуванням. При цьому диски 11, утворюють посівні борозенки із ковзаючим розрізанням рослинних решток в приповерхневому шарі ґрунту, а висівний апарат 6, відбирає в цей час із зернотукового ящика 5 посівний матеріал і спрямовує його по зернотукопроводах 7 у сошники 10, які загортають їх у незасмічене посівне ложе борозенок. При цьому незалежне копіювання рельєфу поля сошниками 10 здійснюється за рахунок зміни довжини валів 14 компенсаторами 15, а обертовий рух від регулятора 16 передачам 20, 21 забезпечується за рахунок сумісного їх провороту із повідком 8 відносно осі 9. З підвищенням силового зусилля на валу 3 від привідних механізмів, спричинене зміною умов роботи, підвищується навантаження на опорно-привідні колеса 2, що призводить до підвищення їх проковзування і тим самим порушення стабільності роботи висівного апарату 6 і дисків 11 сошників 10. При цьому врівноважувач 17, сприймаючи інформацію від датчика 4 про підвищене силове зусилля на валу 3, створює протидіючу обертову силу, яка через регулятор 16, привід 18 і 19 сприймається висівним апаратом 6, а через передачі 20 і 21, вали 14, 12 сприймається дисками 11. В результаті на опорно-привідних колесах 2 підтримується допустиме їх проковзування, а отже і стабільний обертальний рух його вала 3, забезпечуючи тим самим стабільну роботу висівного апарату і формування дисків 11 незасмічених посівних борозенок із загортанням в них посівного матеріалу у відповідності із заданими умовами посіву.

Підвищення ефективності такої машини на посіві зернових та інших культур досягається за рахунок створення умов стабільного обертального руху приводу висівного апарату та дисків сошників зрівноважуванням надмірного зусилля на валу опорно-привідних коліс застосуванням врівноважувача на посівній машині.

Висновки

У результаті аналітичних досліджень технологічного процесу посіву зернових культур машинами із дисковими сошниками

установлено, що формування ними посівних борозенок із незасміченим посівним ложе на полі із поверхневими рослинними рештками відбувається із суттєвим відхиленням від агротехнічних вимог. Причиною цього, як виявилось, є те, що привід висівного апарату і дисків сошників від опорно-привідних коліс створює на них додаткове навантаження, що спричинює надмірне їх проковзування, внаслідок чого порушується стабільність роботи привідних механізмів, а отже і формування ними посівних борозенок із незасміченим посівним ложе. В результаті творчих пошуків запропонована машина для посіву зернових культур із установленим енергетично забезпеченим врівноважувачем обертової сили, який кінематично зв'язаний з приводом висівного апарату і дисків та функціонально з датчиком крутного моменту, установленого на валу опорно-привідних коліс. Застосування такої машини у виробничих умовах підвищить врожайність зернових культур за рахунок формування посівних борозенок із незабрудненим посівним ложе, що покращує умови проростання і подальшого розвитку насіння, висіяного в такі борозенки.

Література

1. Войтюк Д.Г., Гаврилюк Г.Р. Сільськогосподарські машини: підручник: Київ : Каравела, 2023. 552 с.
2. Гудзь В.П. Землеробство. навч. посіб. Київ : ЦУЛ, 2010. С. 377.
3. Заїка П.М. Теорія сільськогосподарських машин. Машини для заготівлі кормів. Харків: ОКО, 2003. 345 с.
4. Хайліс Г.А., Федорусь Ю.В. *Механіка рослинних матеріалів : навч. посіб.* Луцьк : ЛДТУ, 2004. 302 с.
5. Горобей В.П., Лузін В.А., Вожегова Р.А. Дослідження робочих органів зернової сівалки для технології з мінімальною обробкою ґрунту. Мелітополь : праці ТДАТУ, вип.13, т.4, 2013. С. 164.
6. Дослідження умов різання стебел із ковзанням / Шейченко В.О., Дудніков І.А., Шевчук В.В., Шевчук В.Г. Кропивницький : ЦНТУ, вип.51. 2021. С. 61-69.
7. Пришляк В. М., Ковальчук О. В., Яропуд В. М. Сільськогосподарські машини. Машини для сівби та садіння : метод.вказівки до виконання лабораторних робіт. Вінниця : ВНАУ, 2012. С.21.
8. Сисолін П. В., Свірень М. О. Висівні апарати сівалок (еволюція конструкцій, розрахунки параметрів): навч. посіб. Кіровоград : ЦНТУ, 2004. С. 310.

9. Дискава сівалка: пат. 151295 Україна: МПК А01С 7/00, № 202200435; заявл. 03.02.22; опубл. 29.06.22, Бюл. № 26. 4 с.

References

1. Voitiuk D. H., Havryliuk H. R. Silskohospodarski mashyny : pidruchnyk. Kyiv : Karavela, 2018. 552 s.
2. Zemlerobstvo : pidruchnyk / V. P. Hudz ta in. ; red. V. P. Hudz. 2-he vyd. Kyiv : Tsentr uchb. lit., 2010. 464 s.
3. Zaika P. M. Teoriia silskohospodarskykh mashyn. Kharkiv : Oko, 2003. T. 2 : Ch. 1. Mashyny dlia zahotivli kormiv. 360 s.
4. Khailis H. A., Fedorus Yu. V. Mekhanika roslыnnykh materialiv : navch. posib. Lutsk : Luts. derzh. tekhn. un-t, 2004. 302 s.
5. Horobei V. P., Luzin V. A., Vozhehova R. A. Doslidzhennia robochykh orhaniv zernovoi sivalky dlia tekhnolohii z minimalnoiu obrobkoiu gruntu. Pratsi Tavriiskoho derzhavnoho ahrotekhnolohichnoho universytetu. 13-te vyd. Melitopol, 2013. T. 4. S. 162–170.
6. Doslidzhennia umov rizannia stebel iz kovzanniam / V. O. Sheichenko ta in. Konstruiuvannia, vyrobnytstvo ta ekspluatatsiia silskohospodarskykh mashyn. 51-she vyd. Kropyvnytskyi, 2012. S. 61–69.
7. Pryshliak V. M., Kovalchuk O. V., Yaropud V. M. Silskohospodarski mashyny. Mashyny dlia sivby ta sadinnia. : Metod. vkazivky do vykonannia laborator. robot. Vinnytsia : Vinn. nats. ahrar. un-t, 2012. 84 s.
8. Sysolin P. V., Sviren M. O. Vysivni aparaty sivalok (evoliutsiia konstruksii, rozrakhunky parametriv) : navch. posib. Kirovohrad : Tsentralnoukr. nats. tekhn. un-t, 2004. 159 s.
9. Dyskova sivalka : pat. 151295 Ukraina : A01C7/00. № u202200435 ; zaiavl. 03.02.2022 ; opubl. 29.06.2022, Biul. № 26. 4 s.

Melkonov H.L., Fesenko H.V., Kurlov V.I., Increasing the functionality of a seed drill with disc coulters

Increasing the yield of agricultural crops is closely related to the creation of proper conditions for seed germination when forming seed furrows by the working bodies of seeding machines. This is especially true for seeding machines with disc coulters, which, along with their advantages, allow the formation of furrows with significant clogging of their seedbed with plant residues. The reason for this, as it turned out, is that the coulter discs, rolling over the soil, with their pressing action on plant residues, with insufficient resistance from the soil, are unable to cut them, so they move them to the bottom of the furrows and leave them in the seedbed. Proper

conditions for germination of seeds sown in such furrows are not created, which ultimately leads to a decrease in crop yields. It is possible to increase the cutting efficiency of the discs by giving them a rotating sliding motion, which requires reduced pressure on them when cutting plant residues. As a result, the cutting of plant residues by discs occurs in the surface layer of the soil, which prevents their movement to the seedbed of the furrows. Search studies have revealed a seeding machine, the coulter discs of which cut plant residues with slipping due to the fact that the shafts of the discs of each coulter are connected to each other by a hinge mechanism, and their opposite ends are connected to the outer ends of the shafts of adjacent coulters by hinge shafts, which are kinematically connected to the support and drive wheels of the seeding machine. At the same time, the drive of the coulter discs and the seeding unit during sowing can significantly increase the load on the support and drive wheels of the seeding machine, which will cause their excessive slipping, as a result of which the stability of the rotational movement of the drive mechanisms will be disturbed. It has been established that the stability of the rotational movement of the drive mechanisms of the sowing machine can be ensured by preventing excessive slippage of its support and drive wheels by balancing the increased rotational force on their drive shaft. Such is the proposed sowing machine, which includes an energy-powered balancer, which, under conditions of excessive slippage of the support and drive wheels, balances the increased rotational force on their drive shaft, thereby ensuring the stability of the operation of the sowing unit and the rotational movement of the coulter discs with slippage during sowing of agricultural crops.

Keywords: machine, sowing, furrows, seedbed, slippage, disc.

Мелконов Григорій Леонідович – к.т.н., доцент, завідувач кафедри механізації сільського господарства Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля, e-mail: g.melkonov78@snu.edu.ua.

Фесенко Григорій Васильович – к.т.н., доцент кафедри механізації сільського господарства Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля, e-mail: h.fesenko@snu.edu.ua.

Курлов В'ячеслав Ігорович – викладач циклової комісії технічних дисциплін Відокремленого структурного підрозділу «Старобільський фаховий коледж Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля», e-mail: kurlov@stbcol.ukr.education.

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-290-4-83-89>

UDK 629.463.001.18

CAUSE AND EFFECT RELATIONSHIPS OF FAILURES IN THE FUNCTIONING OF STRUCTURAL COMPONENTS OF RAILWAY ROLLING STOCK

Fomin O.V., Burlutskiy O.V., Khara M.V., Rybachenko Y.M.

ПРИЧИННО-НАСЛІДКОВІ ЗВ'ЯЗКИ ВИНИКНЕННЯ ВІДМОВ ФУНКЦІОНУВАННЯ КОНСТРУКТИВНИХ СКЛАДОВИХ РУХОМОГО СКЛАДУ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ

Фомін О.В., Бурлуцький О.В., Хара М. В., Рибаченко Я.М.

The article reveals the peculiarities of the importance of research work on determining the cause and effect relationships of failures of the functioning of structural components of railway rolling stock can hardly be overestimated due to their multifaceted role in ensuring the safety, efficiency and economy of railway transportation. These studies are critical to improving traffic safety, as failures of structural elements can lead to catastrophic consequences, including human casualties and significant material damage. Cause-and-effect analysis allows for the development of effective methods to prevent such failures, minimising the risk of accidents. From the perspective of operational efficiency, research into the causes of failures helps to optimise maintenance and repair processes, reducing downtime and increasing the reliability of rolling stock, which in turn contributes to the smooth movement of goods and passengers, increasing the economic efficiency of rail transport. Particular attention is paid to the analysis of physical and mechanical factors related to the metal manufacturing process and operational factors, such as corrosion damage.

In addition, research and development plays a key role in reducing operating costs, as predicting and preventing failures reduces the amount of repair work and overall maintenance costs. Research also contributes to extending the service life of rolling stock by identifying weaknesses in design and materials, which allows for the development of measures to strengthen and improve them. An important aspect is the introduction of new technologies, such as remote monitoring systems and non-destructive diagnostics, which allow potential failures to be detected at an early stage, increasing safety and efficiency. Finally, research into the causes of failures helps to reduce the risk of environmental disasters, especially when transporting hazardous goods, ensuring the environmental safety of rail transport. It is

proved that research and development is an integral part of ensuring the safety, efficiency and economy of railway transport.

Keywords: *Transport, freight transportation, automation, reliability, rolling stock, traffic safety, cause and effect relationships.*

Introduction. Ukraine's railway industry accounts for 75% of the country's total cargo turnover. According to operational data, in 2024, Ukrzaliznytsia transported 174.93 million tons of cargo, which is 17.9% more than in 2023, and in 2021 - 314 million tons. The fleet of freight cars used for transportation includes more than 120 thousand cars. At the same time, the average level of depreciation of Ukrzaliznytsia's fleet remains critical at 90%. In particular, 73.3 thousand railcars (70%) have exceeded their standard service life, 18.4 thousand have served one and a half years of their standard service life, and, accordingly, the wear and tear on their bodies and running gear means an increase in accidents and traffic safety requirements, and they should be written off. By 2026, 40 thousand railcars, or one in three, are to be written off. At the same time, experts estimate that the number of new railcars needed is almost 145 thousand units. That is, there is a huge shortage of freight cars, which is partially covered by cars from non-state-owned operating companies or foreign cars. This state of the railcar fleet requires its renewal. Renewal of the fleet is critically needed - currently, only 1 railcar out of 6 meets modern requirements [1].

It is known [2] that the strength of structures is due to the joint action of the following factors: metallurgical (reflects the properties of the material - strength, corrosion resistance, weldability, fracture toughness, etc.), structural (takes into account the peculiarities of the formula of parts), technological (takes into account the peculiarities of the manufacturing technology), operational (reflects the operating conditions). Methods of studying structural strength based on an integrated approach allow taking into account the main parameters characterizing the metal state, manufacturing technology, and operating conditions to the fullest extent possible. The most effective methodology for these purposes is the systematic approach.

It is difficult to overestimate the cause-and-effect relationships of failures of structural components of railway rolling stock due to their multifaceted role in ensuring the safety, efficiency and economy of railway transportation. These studies are critical to improving traffic safety, since failures of structural elements can lead to catastrophic consequences, including human casualties and significant material damage. [3].

From the point of view of traffic safety, studies [4] have been conducted that focus on the important problem of risk prediction in the diagnosis of freight car axle assemblies, which is of great importance for improving the safety of rail transportation. However, it is necessary to describe in more detail the algorithms and methods used in the predictive model, as well as to validate the model on a large amount of data. Also, in particular, insufficient attention has been paid to improving structural reliability. Publication in a reputable publication increases the credibility of the model, but more information is needed for a full analysis.

Study [5] focuses on the important problem of the dynamic interaction of a freight car and a three-component bogie with increasing axle load, which is of great practical importance for improving the safety and efficiency of freight transportation. However, it is necessary to investigate more deeply the influence of different types of cargo and operating conditions on dynamic characteristics, as well as to validate numerical models with experimental data. In particular, insufficient attention has been paid to analyzing issues related to improving structural reliability.

Studies [6,7] focus on the important problem of detecting and classifying damage to railway gondola cars, which is of great practical importance for improving the safety and efficiency of freight transportation, gondola cars make up a significant part of the freight car fleet, they are used most intensively Fig. 1. However, it is necessary to investigate more deeply the influence of various factors that affect traffic safety, for a full analysis it is necessary to analyze the cause and effect relationships

Preventing railcar derailments depends on the quality of maintenance, compliance with operating rules and prompt response in emergency situations. It is important to continuously improve monitoring systems and staff training.

Purpose of the article and summary of the main material

The article presents the features and results of the analysis of the cause-and-effect relationship of failures of the functioning of structural components of railway rolling stock that affect train traffic safety. Based on the analysis, an empirical Pareto diagram was constructed on the basis of the development of Ishikawa diagrams in terms of traffic safety.

Based on the analysis [6-8], a traffic safety rating for technical equipment failures is developed, as well as a rating for traffic safety indicators.

For 2024, the risk rating of violations by traffic safety indicators according to [8] improved and amounted to 1.0, compared to 2023 - it was 1.14 (Fig. 1-2.) Based on the above ratings, the Ishikawa cause-and-effect diagram will be further constructed. events related to violations of vehicle safety.

It should be noted that the Ishikawa diagram is not constructed in the classical form, and only three types of factors affecting train safety were studied (Fig. 3).

Analyzing the root causes according to the Kaura Ishikawa diagram in Fig. 3, it is clear that in 2024 the main reasons affecting the number of technical equipment failures are

- train inspection technology;
- failure to comply with the technology for testing brakes from stationary installations, corrosion wear and tear, and breakage of load-bearing systems
- Inconsistency in the discharge of work;
- poor staff skills.

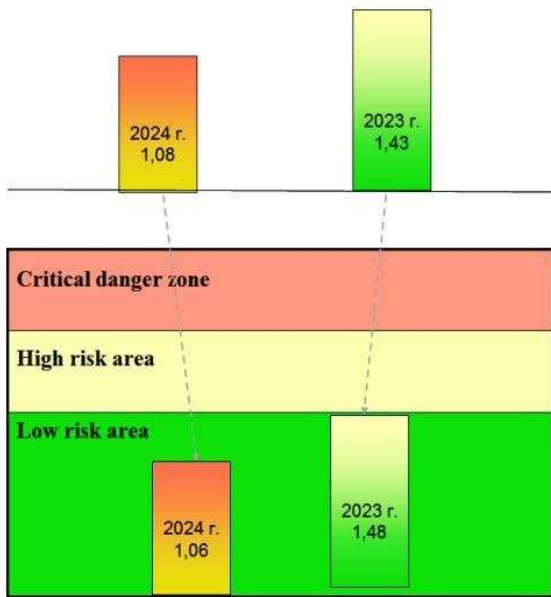


Fig. 1. Traffic safety ranking by failures of technical means

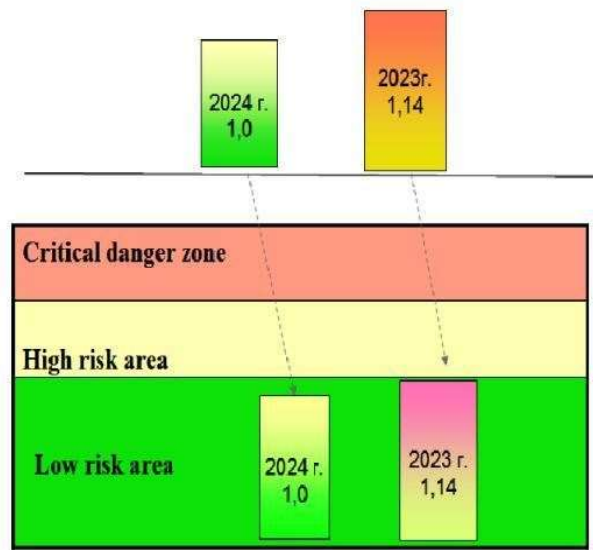


Fig. 2. Traffic safety ranking by performance

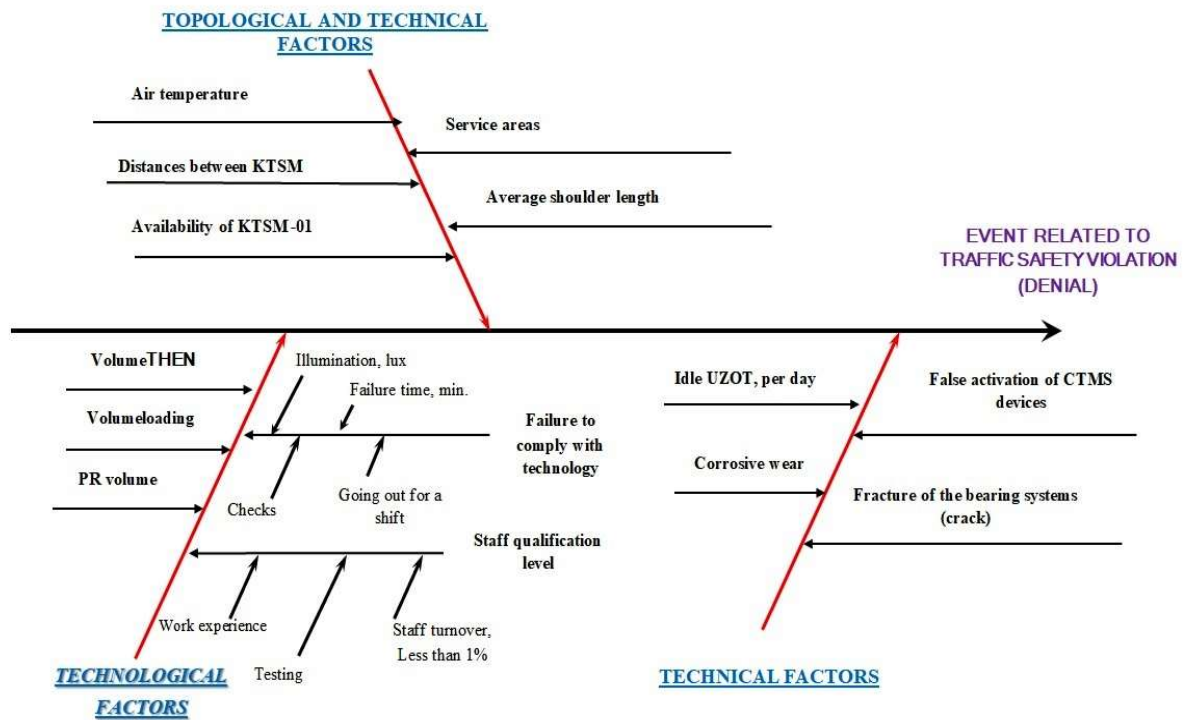


Fig. 3. Cause and effect diagram of Ishikawa events (technical equipment failure) related to traffic safety violations

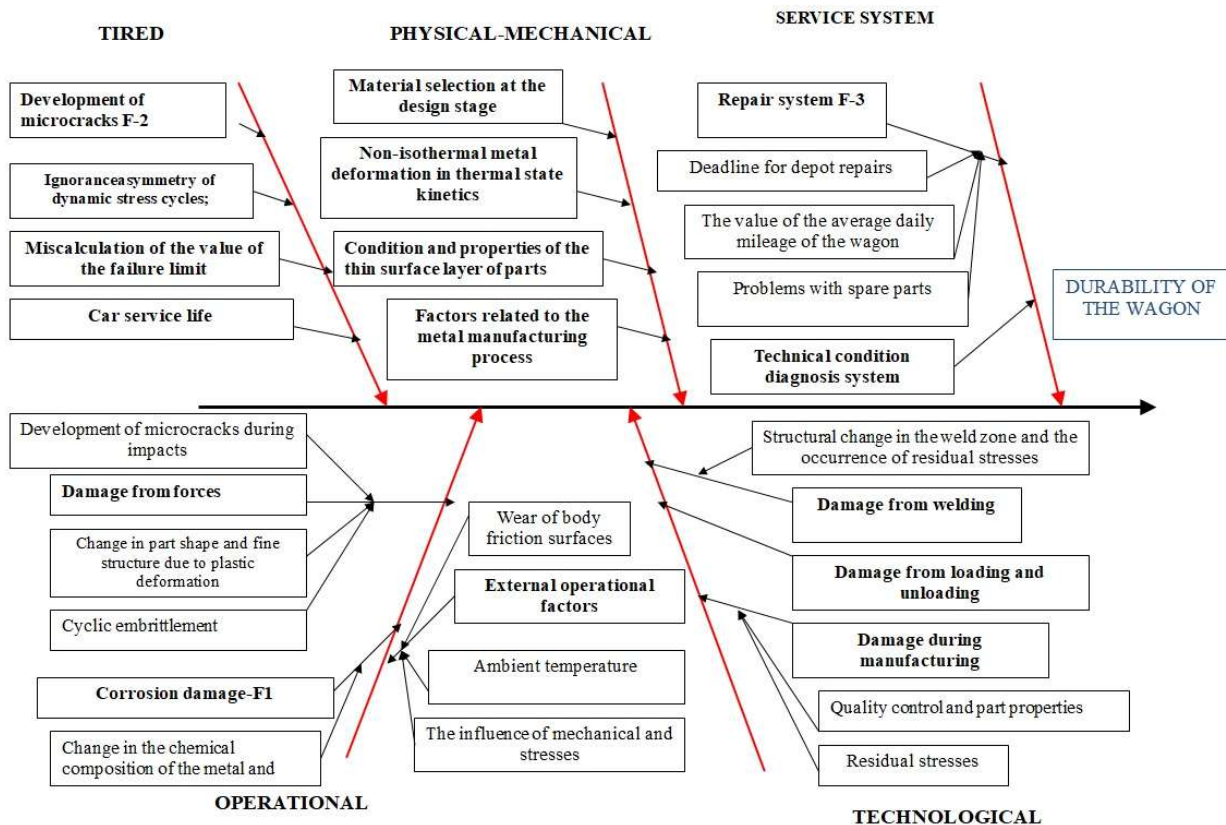


Fig. 4. Cause and effect relationships between railcar performance and operational damage, 5-parameter Ishikawa diagram

Fig. 4 shows the Ishikawa diagram with cause and effect relationships, which shows the impact of various factors and events that affect the level of gondola car performance.

At the stage of accidental operational factors, the diagram identifies power; external and corrosion effects.

First of all, it should be noted that there is no strict, generally accepted definition of the term “accidental operational factors”.

The diagram shows the most significant factors affecting the durability of a gondola car. In accordance with the diagram, five areas of research should be organized and work should be organized in each area according to the classification by level 3 factors. If necessary, each of the factors in the Ishikawa diagram can be subjected, in turn, to a cause-and-effect analysis, which greatly expands the capabilities of this diagram.

Based on the results of the above cause-and-effect relationships, five groups of factors are distinguished that reduce the performance of the studied elements of gondola bodies arising at each stage of their life cycle. Each group of factors leads to a mismatch in the durability of a particular structural component.

When analyzing causality, an impact may have a number of causal factors that can be grouped into different categories. The causal factors are often identified through a brainstorming exercise and are presented in a tree structure (causal tree). A systematic approach to identifying hazards, as a rule, guarantees the identification of most hazards. To apply the systematic approach, we propose to use factor analysis, which is developed based on the analysis of events and data from the BP.

The Pareto distribution for a random variable X with parameters x_m (minimum value, $x_m > 0$) and k (shape parameter, $k > 0$) is given by the following probability distribution function:

Distribution Function (CDF)

$$F_X(x) = P(X \leq x) = \begin{cases} 1 - \left(\frac{x_m}{x}\right)^k, & \text{if } x \geq x_m, \\ 0, & \text{if } x < x_m. \end{cases} \quad (1)$$

Probability density function

The derivative of CDF gives the density:

$$f_X(x) = \begin{cases} \frac{k \cdot x_m^k}{x^{k+1}}, & \text{if } x \geq x_m, \\ 0, & \text{if } x < x_m. \end{cases} \quad (2)$$

The moments of a random variable having a Pareto distribution are given by the formula:

$$E[X] = \begin{cases} \frac{k \cdot x_m}{k-1}, & \text{if } k > 1, \\ \infty, & \text{if } k \leq 1. \end{cases} \quad (3)$$

Dispersion:

$$D(X) = \begin{cases} \frac{k \cdot x_m^2}{(k-1)^2(k-2)}, & \text{if } k > 2, \\ \infty, & \text{if } k \leq 2. \end{cases} \quad (4)$$

The variance is finite only at $k > 2$.

Median:

$$M(X) = x_m \cdot 2^{1/k}.$$

A Pareto diagram allows you to distribute efforts to solve emerging problems and identify the main factors that need to be addressed to overcome emerging problems. There are two types of Pareto diagrams: by results and by causes. In a generalized sense, Pareto's law leads to the self-similarity of the ABC curve and can be a starting point for building a multinomial factor analysis model. (Fig. 5) shows an empirical Pareto diagram based on the 5-parameter Ishikawa diagram

Fig. 5 shows that in this case, the priority measures should be aimed at detecting and eliminating faults in systems F1, F2 and F3.

F1-Structural factors 40%, influence (*materials of construction*: steel (carbon/low alloy),aluminium alloys, composite *frame and body construction*: stiffness and load distribution, quality of welded joints, *corrosion protection*: hot-dip galvanizing, polymer coatings, cathodic protection (for tanks).

F2-Operational factors 30%, (*operating mode*:intensity of use, weight loads (overloads), *operating conditions*:

climatic effects (temperature, humidity), aggressive environments (sea air, chemicals), *quality of maintenance*:timeliness of repairs, compliance with maintenance schedules).

F3-. External influences 15% (*dynamic loads*:vibrations and shocks, aerodynamic forces (for high-speed wagons), *corrosion processes*:atmospheric corrosion, electrochemical corrosion).

F4-Technological factors 10% (*manufacturing quality*:assembly accuracy, weld inspection (defectoscopy), *monitoring systems*: condition monitoring sensor, diagnostic systems (predictive mainte)).

F5-Regulatory requirements 4,6 % (*compliance with standards, requirements for*: strength of construction stabilit, safety).

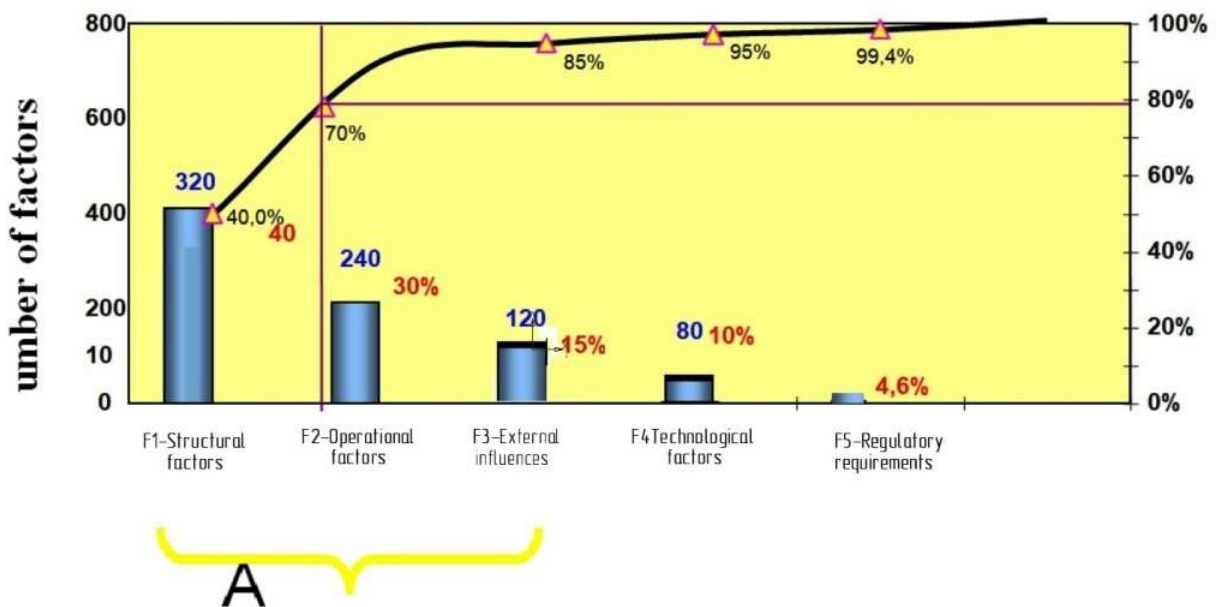


Fig. 5. Empirical Pareto diagram based on the 5-parameter Ishikawa diagram

Conclusions:

Research into the cause and effect of rolling stock failures is a strategic area for ensuring the competitiveness of rail transport, reducing accidents and moving to a preventive maintenance model. They integrate knowledge from mechanics, materials science, cybernetics and ecology, making them interdisciplinary and innovative.

The main causes of failures in rolling stock structures are material fatigue, which leads to cracks and fractures under cyclic loads and vibrations, corrosion processes that significantly reduce the strength of metal parts, poor repair quality that causes repeated failures due to insufficient staff qualifications, overloading of rolling stock that accelerates wear and damage, extreme operating conditions such as temperature fluctuations, humidity and pollution that require the use of special materials, and human error.

Despite the research conducted on the corrosion problem and the design and technological measures developed on the basis of their results, corrosion is the most common type of defect in the metal power structure of a gondola car body. This is mainly due to the two circumstances described below. Firstly, the corrosion resistance characteristics of modern metals and the methods used to protect the structure from aggressive environments do not ensure a low probability of corrosion. Secondly, modern science, with a solid amount of knowledge about the types and mechanisms of corrosion damage, does not offer railcar designers acceptable methods for predicting the time of corrosion initiation and the rate of its development.

The material considered in this work is the basis for solving such important issues as:

- study of material (steel) properties of vehicle parts and processes leading to their failures;
- assessment of the effect of overloading on crack growth;
- determination of critical dimensions, shape and position of defects.
- Corrosion prevention by design measures such as: avoiding water stagnation (drainage holes, inclined surfaces), sealing welds and joints, using composite steels or rubber or plastic pads in places of mechanical wear, for individual vehicle components.
- Combating post-weld deformations.

References

1. Fedyay N.O. Stasiuk, O.M. Chmyriova, L.Y. Substantiation of the need to renew the fleet of freight cars of JSC 'Ukrzaliznytsia. Effective Economy' 2025, N2. 35-62 DOI: <http://doi.org/10.32702/2307-2105.2025.2.74>
2. Fomin O. V. Research of defects and damages of the bearing systems of railway gondola cars: monograph / O. V. Fomin. Kyiv: DETUT, 2014. 299 p.
3. Directive (EU) 2016/798 of the European Parliament and of the Council of 11 May 2016 on railway safety. Access to European Union law EUR-Lex.URL: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2016/798/oj/eng>
4. Muradian L, Pitsenko I, Shaposhnyk V, Shvets A, Shvets A. Predictive model of risks in railway transport when diagnosing axle boxes of freight wagons. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F. 2022;237(4):528-532. doi:10.1177/09544097221122043
5. Shvets, A. O. Dynamic interaction of a freight car body and a three-piece bogie during axle load increase. Vehicle System Dynamics, 2021. 60(10), 3291-3313. <https://doi.org/10.1080/00423114.2021.1942930>
6. Fomin O.V., Burlutskyi O.V., Fomin V.V. Analysis of operational damage to the bodies of railway gondola cars, Construction of Ukraine. 2013. Issue No. 3. С 37-41.
7. Martynov I. E., Shovkun V. O., Trufanova A. V., Lytovchenko O. M., Dmytrenko M. V., Balashov O. O. Research of the technical condition of universal gondola cars, Collection of scientific works of the Ukrainian State University of Railway Transport. 2024, Issue 209, Pp. 66-75. DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.209.2024.314256>
8. Analysis of the state of traffic safety and accidents on land transport in Ukraine for 9 months of 2023.
9. Engineering of crises and risks of transport services: a collective monograph / V.M. Samsonkin, I.V. Nikolayenko, Y.V. Bulgakova et al.

Фомін О.В., Бурлуцький О.В., Причинно-наслідкові зв'язки виникнення відмов функціонування конструктивних складових рухомого складу залізничного транспорту

Стаття розкриває особливості важливості, науково-дослідних робіт, з визначення причинно-наслідкових зв'язків виникнення відмов функціонування конструктивних складових рухомого складу залізничного транспорту важко переоцінити через їхню багатогранну роль у забезпеченні безпеки, ефективності та економічності залізничних перевезень. Ці дослідження є критично важливими для підвищення безпеки руху, оскільки відмови конструктивних елементів можуть призвести до катастрофічних наслідків, включаючи людські

жертви та значні матеріальні збитки. Аналіз причинно-наслідкових зв'язків дозволяє розробити ефективні методи запобігання таким відмовам, мінімізуючи ризики аварійних ситуацій. З точки зору ефективності експлуатації, дослідження причин відмов допомагають оптимізувати процеси технічного обслуговування та ремонту, зменшуючи час простоїв та підвищуючи надійність рухомого складу, що в свою чергу, сприяє безперебійному руху вантажів та пасажирів, підвищуючи економічну ефективність залізничних перевезень. Особливу увагу приділено аналізу факторів фізико-механічного характеру пов'язаними з процесом виготовлення металу та експлуатаційного, таким як пошкодження від дії корозії.

Крім того, науково-дослідні роботи відіграють ключову роль у зниженні експлуатаційних витрат, оскільки прогнозування та запобігання відмовам дозволяє зменшити обсяги ремонтних робіт та знизити загальні витрати на обслуговування. Дослідження також сприяють подовженню терміну служби рухомого складу, виявляючи слабкі місця в конструкції та матеріалах, що дозволяє розробляти заходи щодо їх посилення та покращення. Важливим аспектом є впровадження нових технологій, таких як системи дистанційного моніторингу та безрозбірної діагностики, які дозволяють виявляти потенційні відмови на ранніх стадіях, підвищуючи рівень безпеки та ефективності. Нарешті, дослідження причин відмов допомагають знизити ризик екологічних катастроф, особливо при перевезенні небезпечних вантажів, забезпечуючи екологічну безпеку залізничних перевезень. Доведено, що науково-

дослідні роботи є невід'ємною частиною забезпечення безпеки, ефективності та економічності залізничного транспорту.

Ключові слова: Транспорт, перевезення вантажів, автоматизація, надійність, рухомий склад, безпека руху, причинно-наслідкові зв'язки.

Фомін Олексій Вікторович – д.т.н., професор кафедри «Вагони та вагонне господарство» Державний університет інфраструктури та технологій, вул. І. Огієнка, 19, м. Київ, 03049, Україна, fominaleksejviktorovic@gmail.com

Бурлуцький Олексій Вікторович – к.т.н., асистент, кафедри «Механіки і проектування машин» Український державний університет залізничного транспорту м. Харків, 610508, Україна, leha2006181@gmail.com

Хара Марина Володимирівна – Ph.D, доцент, кафедри «Транспортних технологій підприємств» Приазовський державний технічний університет, вул. Гоголя, 29, м. Дніпро, 49000, Україна, e-mail: haramarina4691@gmail.com

Рибаченко Ярослав Михайлович – аспірант, кафедри «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології транспорту» Державний університет інфраструктури та технологій, вул. І. Огієнка, 19, м. Київ, 03049, Україна, e-mail: rybachenko_yam@gsuite.duit.edu.ua

Стаття подана 08.04.2025.

ЕКОНОМІЧНІ НАУКИ

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-290-4-90-97>

УДК 621.31,332.31

ЕКОНОМІЧНІ АСПЕКТИ ВИКОРИСТАННЯ ВТОРИННИХ РЕСУРСІВ ТА МАТЕРІАЛІВ У КОНТЕКСТІ ЦИРКУЛЯРНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ

Мельничук І.В., Возний В.З.

ECONOMIC ASPECTS OF THE USE OF SECONDARY RESOURCES AND MATERIALS IN THE CONTEXT OF CIRCULAR ENERGY

Melnychuk I. V., Voznyi V.Z.

Використання вторинних ресурсів у формуванні сталих енергетичних систем є важливим для розвитку сучасної економіки, оскільки сприяє зменшенню залежності від викопних джерел енергії, зниженню рівня забруднення довкілля та оптимізації ресурсокористування. Зростаючий попит на енергію та виснаження природних ресурсів роблять циркулярні підходи до енергетики необхідністю, а використання відходів як ефективних енергоносіїв і інтеграція інноваційних технологій перетворюють вторинні ресурси на ключовий елемент сталого розвитку. Сучасні тренди замкнених енергетичних систем орієнтовані на цифровізацію управління енергетичними потоками, використання штучного інтелекту для підвищення ефективності переробки вторинних ресурсів.

Прикладом є країни G7, що інвестують в інноваційні енергоефективні технології та оптимізують логістичні ланцюги для зменшення відходів. Концепція Circular Energy зосереджується на максимальному зменшенні відходів і технологіях переробки, перепрофілювання і рециклінгу в енергетичних системах, підкреслюючи важливість сталого розвитку. Додатково, ефективне управління вторинними ресурсами дозволяє значно скоротити викиди парникових газів, зменшити навантаження на природні екосистеми та підвищити рівень енергетичної незалежності країн.

Стимулювання цього сектору містить податкові пільги, субсидії та екологічні норми, які сприяють економічній ефективності індустрії. Також уряди та міжнародні організації розробляють нові регуляторні механізми, спрямовані на розширення можливостей використання вторинних ресурсів та покращення технологій їх переробки. Зокрема,

інвестиції в дослідження і розвиток сприяють створенню нових матеріалів з покращеними енергетичними характеристиками, що можуть ефективно замінювати традиційні викопні ресурси. Наведені аспекти підкреслюють вплив вторинних ресурсів на формування сталих економічних моделей, зниження витрат виробництва і підвищення енергоефективності в сучасній промисловості. Використання циркулярних принципів в енергетиці є ключовим фактором для досягнення кліматичних цілей та забезпечення довгострокової екологічної стійкості.

Ключові слова: циркулярна енергетика, сталий розвиток, економічні аспекти, енергетична ефективність, бізнес моделі

Вступ. Використання вторинних ресурсів у формуванні сталих енергетичних систем є важливим напрямом розвитку сучасної економіки, оскільки сприяє зменшенню залежності від викопних джерел енергії, зниженню рівня забруднення довкілля та оптимізації ресурсокористування. Зростаючий попит на енергію та виснаження природних ресурсів роблять циркулярні підходи до енергетики необхідністю, а не просто трендом. Використання відходів у якості енергоносіїв, рециклінг матеріалів та інтеграція інноваційних технологій перетворюють вторинні ресурси на ключовий елемент сталого розвитку. Це особливо актуально для промислово розвинених країн та тих, що прагнуть досягти енергетичної

незалежності, знижуючи викиди парникових газів і покращуючи ефективність виробництва.

Сучасні тренди у сфері сталих енергетичних систем акцентують увагу на розвитку технологій замкненого циклу, цифровізації управління енергетичними потоками та впровадженні штучного інтелекту для підвищення ефективності використання вторинних ресурсів. Такі країни, як Німеччина, Швеція та Нідерланди, активно розвивають концепцію "waste-to-energy", використовуючи органічні відходи для генерації біогазу та синтетичного палива [1]. Крім того, глобальні ініціативи щодо зменшення пластикового забруднення стимулюють створення технологій для переробки полімерних матеріалів у паливо або сировину для прийняття нових енергетичних рішень. Усе це вказує на те, що використання вторинних ресурсів є не лише екологічно доцільним, а й економічно вигідним шляхом до сталого енергетичного майбутнього.

Метою цієї статті є аналіз економічних аспектів впровадження принципів циркулярної економіки та циркулярної енергетики у промисловості, а також визначення ключових механізмів стимулювання сталого розвитку цього сектора

Виклад основного матеріалу дослідження Згідно зі звітом World Cities Report [2], більше 3/4 світової енергії споживається містами, і вони викидають більше 3/5 викидів ПГ (парникових газів). Пандемія COVID-19 кинула міжнародні та національні ініціативи в хаос. Хоча поки що неможливо повністю оцінити наслідки пандемії, вона, безсумнівно, скоротила світове економічне виробництво [3]. Щоб допомогти економіці відновитися, багато урядів лише частково послабили карантинні заходи. За даними Міжнародного валютного фонду, у 2020 році світова економіка впала на 3% [4].

Країни G7 маючи жорсткі закони та політику, готові інвестувати в енергоефективні технології виробництва з меншими викидами та виробництвом відходів. Крім того, дотримуючись принципів циркулярної економіки, промисловість у таких країнах прагне мінімізувати свої відходи в ланцюгах поставок. Впровадження методів економічного виробництва та наявність потужної симбіотичної мережі та зворотної логістичної інфраструктури означає менше утворення відходів. Усі ці заходи лежать в основі інновацій зелених технологій, спрямованих на запобігання деградації навколишнього середовища,

збереження природних ресурсів і залучення до передових процесів виробництва та переробки [5]. Результати таких заходів, тобто впровадження стійких технологій, що супроводжуються діяльністю з виробництва та споживання чистої енергії, мають потенціал для досягнення 90% цілей щодо зменшення деградації навколишнього середовища у світі [6]. Однак у цьому відношенні роль екологічних норм вважається дуже важливою, що може бути можливим завдяки суворій екологічній політиці. Однак проблема країн Великої сімки полягає у відсутності синергії дій при такому різноманітному формуванні та реалізації політики [7]. Прикладом такої політики може бути накладення податку на викиди вуглецю на нестабільну виробничу та транспортну діяльність. Інші політики включають виробництво та споживання чистіших енергетичних технологій. У цьому випадку значну увагу приділяється таким технологіям відновлюваної енергії, як вітрова, сонячна, біомаса, гідро- та геотермальна. Вважається, що впровадження відновлюваних джерел енергії в G-7 допоможе вирішити проблеми погіршення навколишнього середовища, а також забезпечити енергетичну безпеку.

Circular Energy означає системний підхід до використання енергії, відхід від лінійних моделей споживання до замкнутих систем.

Ця концепція зосереджена на мінімізації відходів і максимальному збільшенні ефективності використання ресурсів у рамках енергетичних циклів. Він наголошує на повторному використанні, перепрофілюванні та переробці енергетичних ресурсів і матеріалів, спрямованих на зменшення впливу на навколишнє середовище та підвищення доступності ресурсів у довгостроковій перспективі. Основна ідея полягає в розробці енергетичних систем, які відновлюють ресурси, а не виснажують їх, сприяючи більш сталому та стійкому енергетичному майбутньому.

Термін «циркулярна енергія» є неологізмом, який прямо відображає його основні принципи. «Циркуляр» базується на концепції циркулярної економіки, наголошуючи на замкнутих системах і циклах, на відміну від лінійних моделей «бери-зроби-викидай». «Енергія» стосується енергії, отриманої з фізичних або хімічних ресурсів, яка використовується для роботи машин або забезпечення тепла чи світла. Поєднання цих термінів лінгвістично означає енергетичну систему, призначену для роботи в циклах,

віддзеркалюючи природні екосистеми, де ресурси постійно використовуються повторно. Його поява пов'язана зі зростаючим усвідомленням обмеженості ресурсів і потреби в екологічних практиках.

У рамках сталого розвитку Circular Energy є життєво важливим компонентом для досягнення екологічного балансу та безпеки ресурсів. Він безпосередньо стосується проблем, пов'язаних із виснаженням енергії, забрудненням від виробництва енергії та утворенням відходів. Пропагуючи відновлювані джерела енергії та ефективне зберігання енергії, циркулярність мінімізує залежність від обмеженого викопного палива. Крім того, він заохочує інноваційні технології та практики, які зменшують споживання енергії та відновлюють енергію з потоків відходів. Цей підхід робить значний внесок у пом'якшення зміни клімату та сприяння більш екологічно відповідальному енергетичному сектору.

Circular Energy охоплюють різні сектори, включаючи міське планування, промислові процеси та дизайн продукції. Промисловість запроваджує замкнуті виробничі процеси, які відновлюють і повторно використовують енергію. Дизайн продукції все більше зосереджується на довговічності, ремонтпридатності та переробці, щоб подовжити життєвий цикл продукції та мінімізувати енергію, втілену в новому виробництві. Інтелектуальні мережі та рішення для накопичення енергії також забезпечують ефективний розподіл і використання відновлюваної енергії, підвищуючи циркулярність потоків енергії у більших масштабах [8].

Відповідно до вищенаведеної інформації, результатів наукових досліджень, тенденцій застосування інструментів циркулярної економіки можна сформулювати наступні економічні аспекти, що мають місце в результаті використання вторинних ресурсів і матеріалів (рис.).

Розглянемо наведені аспекти в секторі промисловості.

Зниження собівартості виробництва у промисловості через використання вторинних ресурсів у контексті циркулярної енергетики є одним із ключових економічних факторів сталого розвитку. Переробка та повторне використання матеріалів дозволяє підприємствам суттєво скоротити витрати на закупівлю первинної сировини, яка часто є дорогою через обмеженість природних ресурсів і витрати на їх видобуток та транспортування. Використання відходів як енергетичних або виробничих ресурсів знижує витрати на їх утилізацію, а також дозволяє скоротити енергоспоживання завдяки менш енергоємним технологіям переробки у порівнянні з первинним виробництвом. Наприклад, повторне використання металобрухту у металургії дозволяє зменшити витрати електроенергії на виплавку сталі, а застосування переробленого пластику в пакувальній промисловості знижує собівартість продукції за рахунок зменшення витрат на нафтохімічні компоненти. Прикладом може бути Fincumet – провідна компанія з переробки металу у Фінляндії, що спеціалізується на брухті, металевих відходах,



Рис. Економічні аспекти використання вторинних ресурсів в контексті циркулярної енергетики

кабелях і батареях. Розташована поблизу Ікаалінена, вона налічує 43 працівники та з 2018 року працює як дочірня компанія Fortum. Fortum – це міжнародна корпорація, зосереджена на енергетиці, яка відповідає за логістику та постачання Fincumet. Fortum активно розширює сектор переробки та нещодавно відкрила завод з переробки батарей в Ікаалінен. Fortum розпочинає діяльність у сфері переробки електронних відходів, а Fincumet надає для цього спеціалізовані потужності. Компанія прагне створити прибуткову та екологічно стійку систему переробки відходів шляхом оцінки та можливого розширення діяльності [9]. Окрім цього, циркулярні бізнес-моделі, що передбачають довший життєвий цикл матеріалів та продуктів, допомагають підприємствам оптимізувати витрати на виробництво, зберігання і транспортування, підвищуючи загальну ефективність промисловості та сприяючи стійкому економічному розвитку.

Енергетична ефективність у промисловості через використання вторинних ресурсів у контексті циркулярної енергетики є важливим чинником зниження енергоспоживання та оптимізації виробничих процесів. Використання перероблених матеріалів часто потребує значно менше енергії, ніж виробництво з первинної сировини. Наприклад, Алюміній є матеріалом, що може перероблятися нескінченну кількість разів [10-13]: сьогодні близько 75% усього алюмінію, виробленого за всю історію – майже один мільярд метричних тонн – усе ще перебуває в використанні [14,15]. Переробка передбачає переплавлення металу, що потребує лише 5% енергії, необхідної для виробництва нового алюмінію з бокситової руди [16], а повторне використання скла та паперу дозволяє скоротити витрати енергії на відповідні виробничі процеси. За даними Федерального агентства з навколишнього середовища Німеччини, виробництво переробленого паперу заощаджує в середньому 78 відсотків води, 68 відсотків енергії та 15 відсотків викидів CO₂ порівняно з папером, виготовленим із так званої первинної целюлози – зазвичай деревини [17]. Крім того, відходи, які раніше утилізувалися, можуть слугувати вторинними енергетичними ресурсами, наприклад, біогаз із органічних відходів чи паливні брикети з відходів деревини, що дозволяє зменшити залежність від викопного палива. У промисловості це також сприяє підвищенню енергоефективності виробництва шляхом впровадження замкнених циклів використання ресурсів, скорочення втрат енергії

та застосування сучасних технологій рекуперації тепла. Таким чином, циркулярна енергетика сприяє не лише зменшенню енергетичних витрат, а й формуванню більш стійкої та економічно ефективної промислової моделі.

Формування нових ринків та бізнес-моделей у промисловості завдяки використанню вторинних ресурсів у контексті циркулярної енергетики відкриває значні можливості для сталого економічного розвитку. Перехід до замкнених циклів виробництва стимулює появу нових секторів, таких як ринок вторинної сировини, переробки та рециклінгу, а також енергетичного використання відходів. Наприклад, компанії можуть спеціалізуватися на зборі та переробці матеріалів, виробництві продукції з вторинної сировини або постачанні відновлюваних енергоресурсів, отриманих із відходів. Водночас бізнес-моделі змінюються від традиційного лінійного підходу до сервісних концепцій, таких як моделі «продукт як послуга» або орієнтація на спільне використання ресурсів. Це сприяє зниженню вартості володіння продукцією, підвищенню ефективності використання матеріалів та створенню нових робочих місць. Крім того, цифрові технології, такі як блокчейн та штучний інтелект, допомагають оптимізувати процеси обміну ресурсами між підприємствами та підвищують прозорість ланцюгів поставок у циркулярній економіці. Таким чином, використання вторинних ресурсів стимулює розвиток інноваційних рішень та трансформацію промислових ринків у напрямку сталого розвитку. Зменшення екологічних податків і штрафів – перехід на вторинні ресурси дозволяє компаніям мінімізувати екологічні збори та витрати на утилізацію відходів.

Зменшення екологічних податків і штрафів є одним із вагомих економічних стимулів для підприємств, що впроваджують використання вторинних ресурсів у контексті циркулярної енергетики. Багато країн застосовують політику "забруднювач платить", яка передбачає значні податкові зобов'язання для компаній, що генерують великі обсяги відходів або використовують традиційні, неекологічні джерела енергії. До прикладу **Китай** – запровадив систему оплати за забруднення з 2003 року, а в 2018 році змінив її на податок на викиди (Law of the People's Republic of China on Environmental Protection Tax). **Європейські країни** (Німеччина, Італія, Швеція,

Швейцарія, Велика Британія) – активно використовують податки на викиди вуглецю, щоб зменшити викиди CO₂. **США** – з 1971 року впроваджує екологічні податки, такі як податок на викиди сполук сірки та оксиду азоту, поступово створивши розвинену систему екологічного оподаткування. **Польща** – з 1970 року ввела податки на екологію та ресурси, щоб стимулювати компанії до екологічно відповідальної поведінки [23].

Перехід до циркулярної моделі виробництва дозволяє підприємствам скоротити обсяги промислових відходів, зменшити споживання первинної сировини та відповідно мінімізувати екологічний слід, що сприяє зниженню податкового навантаження. Крім того, уряди багатьох країн пропонують податкові пільги, субсидії та знижені ставки для підприємств, що впроваджують інноваційні технології з переробки ресурсів та енергоефективного виробництва. Це не тільки допомагає зекономити кошти на виплатах державі, а й підвищує фінансову стійкість компаній, дозволяючи інвестувати в подальший розвиток сталого виробництва. Як приклад, **Японія** – субсидує екологічні проекти компаній (субсидує діяльність компаній з розвитку електроенергетики з десульфурації димових газів), надає субсидії пов'язані з кількістю скорочень викидів [19]. **Австралія** – створила фонд скорочення викидів (emission reduction fund), що підтримує компанії, які інвестують у зменшення забруднення [20].

Державні стимули та фінансова підтримка відіграють ключову роль у розвитку промисловості, орієнтованої на використання вторинних ресурсів у контексті циркулярної енергетики. Оскільки перехід до замкнених виробничих циклів вимагає значних початкових інвестицій, уряди багатьох країн запроваджують різні механізми фінансової підтримки, спрямовані на стимулювання підприємств до використання відновлюваних матеріалів та енергозберігаючих технологій. Це включає податкові пільги, субсидії, гранти та державні програми фінансування проєктів у сфері циркулярної економіки. Наприклад, у країнах ЄС діють наступні ініціативи:

1. Net-Zero Industry Act (NZIA) – передбачає інвестиції у виробничі потужності для стратегічних технологій із нульовим рівнем викидів, включаючи батареї, паливні елементи, біогаз, уловлювання та зберігання вуглецю. Заплановані інвестиції: 92 млрд євро у 2023-2030 рр.

2. RepowerEU – передбачає 41 млрд євро на адаптацію промисловості до меншого використання викопного палива, що може стимулювати використання вторинних ресурсів.

3. Zero Pollution Action Plan – спрямований на скорочення забруднення, передбачає щорічні інвестиції в розмірі 100-150 млрд євро, значна частина яких спрямована на заходи з попередження забруднення та контролю [18]

Крім того, держави активно розробляють нормативно-правові акти, які зобов'язують підприємства зменшувати кількість відходів та підвищувати рівень їх утилізації. Зелений промисловий план для ери Net-Zero – спрямований на розвиток чистих технологій та зменшення залежності від імпорту, що може включати стимулювання промисловості з вторинною переробкою ресурсів. Європейський зелений курс (EGD) – містить положення про підтримку сталого виробництва та переробки, що також може охоплювати промисловість із вторинною переробкою [18]. Також ініціативи такі як «зелені» тендери, в яких державні замовлення віддаються компаніям із високим рівнем екологічної відповідальності, стимулюють розвиток індустрії вторинних ресурсів. Окремим напрямком є підтримка досліджень та розробок у сфері циркулярної енергетики, що дозволяє створювати нові технології з більш ефективним використанням ресурсів. Комплексна державна підтримка сприяє не лише екологічній модернізації промисловості, а й підвищенню її конкурентоспроможності на глобальному ринку.

Залучення інвестицій та підвищення конкурентоспроможності в промисловості, що використовує вторинні ресурси, є ключовими чинниками розвитку циркулярної енергетики. Впровадження технологій переробки відходів та повторного використання матеріалів відкриває можливості для залучення приватного капіталу та міжнародних фондів, які підтримують сталий розвиток. Інвестори все більше зацікавлені у фінансуванні підприємств, що впроваджують екологічно чисті та енергоефективні рішення, оскільки це відповідає глобальним тенденціям ESG (екологічного, соціального та корпоративного управління). Наприклад, Ellen MacArthur Foundation діє з 2010 року, отримала початкове фінансування в розмірі 6 мільйонів фунтів стерлінгів від п'яти її засновників: B&Q, British Telecom, Cisco, National Grid та Renault. У травні 2017 року фонд започаткував програму підтримки та фінансування інновацій у галузі

управління пластиківими відходами, створивши призовий фонд у розмірі 2 мільйонів доларів США. Організація пропагує принципи циркулярної економіки серед своїх партнерів, зосереджуючи увагу на мінімізації відходів через повторне використання, ремонт і переробку. Такий підхід є основою сталого, замкнутого циклу, що подовжує термін служби продуктів і упаковки, знижуючи необхідність у переробці чи утилізації [21]. Closed Loop Partners: інвестиційна компанія, яка зосереджена на циркулярній економіці, фінансує інновації у сфері переробки та повторного використання матеріалів, проекти з перетворення відходів на енергію та екологічне пакування. У 2024 року Closed Loop Partners' Ventures Group здійснила повторну інвестицію в Earthodic, компанію, що базується в Брісбені та створює біо-основні покриття для паперової упаковки. Це фінансування підтримує розширення компанії на ринку США. Загальна сума раунду фінансування становила 4 мільйони доларів США, хоча конкретна сума інвестиції від Closed Loop Partners не розголошується [22]

Водночас підприємства, що впроваджують циркулярні моделі виробництва, отримують конкурентні переваги завдяки зниженню витрат на сировину, енергозбереженню та відповідності жорстким екологічним стандартам. Це не лише покращує їхній імідж на міжнародних ринках, а й відкриває нові можливості для співпраці з транснаціональними корпораціями, урядами та екологічними організаціями. У результаті такі підприємства стають більш стійкими до ринкових коливань, отримують доступ до нових споживчих сегментів та підвищують свою прибутковість у довгостроковій перспективі.

Отже, існує достатньо економічних важелів, які дозволяють промисловості діяти більш свідомо та ефективно в рамках концепцій циркулярної економіки та циркулярної енергетики. Використання ресурсоефективних технологій, вторинної сировини та відновлюваної енергії може сприяти як зменшенню екологічного навантаження, так і підвищенню економічної стійкості підприємств. Такі зміни можуть бути підтримані державою через субсидії, податкові стимули та фінансування досліджень, а також інвесторами, які готові вкладати кошти у сталі інноваційні проекти. Взаємодія бізнесу, держави та наукової спільноти є ключовою для забезпечення переходу до більш екологічно відповідальної та економічно вигідної моделі виробництва.

Література

1. Zupančič, M., Možic, V., Može, M., Cimerman, F., & Golobič, I. Current status and review of waste-to-biogas conversion for selected European countries and worldwide // *Sustainability*. 2022. Vol. 14, No. 3. P. 1823. DOI: 10.3390/su14031823.
2. World cities report: The value of sustainable urbanization [Електронний ресурс]. – 2020. – Режим доступу: https://unhabitat.org/sites/default/files/2020/10/wcr_2020_report.pdf.
3. Long, A., & Ascent, D. *World Economic Outlook*. – International Monetary Fund, 2020.
4. Le Quéré, C., Jackson, R. B., Jones, M. W., Smith, A. J., Abernethy, S., Andrew, R. M., De-Gol, A. J., Willis, D. R., Shan, Y., Canadell, J. G., & Friedlingstein, P. Temporary reduction in daily global CO₂ emissions during the COVID-19 forced confinement // *Nat. Climate Change*. 2020. Vol. 10, No. 7. P. 647–653.
5. Sharif, A., Saqib, N., Dong, K., & Khan, S. A. R. Nexus between green technology innovation, green financing, and CO₂ emissions in the G7 countries: the moderating role of social globalization // *Sustainable Development*. 2022. Vol. 30, No. 6. P. 1934-1946.
6. Afshan, S., Ozturk, I., & Yaqoob, T. Facilitating renewable energy transition, ecological innovations and stringent environmental policies to improve ecological sustainability: evidence from MM-QR method // *Renewable Energy*. 2022. Vol. 196, No. 1. P. 151-160.
7. Sarfraz, M. et al. The relationship between firms' financial performance and performance measures of circular economy sustainability: an investigation of the G7 countries // *Economic Research-Ekonomiska Istraživanja*. 2023. Vol. 36, No. 1. P. 2545-2572.
8. Sustainability Satelites [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://energy.sustainability-directory.com/area/circular-energy/>.
9. Shopeju, O. Optimization of recycling processes for industrial metal waste (Bachelor's thesis, Savonia University of Applied Sciences) // *Theseus* [Електронний ресурс]. 2024. – Режим доступу: https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/864572/Shopeju_Olakunle.pdf?sequence=2.
10. Gutowski, T. G., Sahni, S., Allwood, J. M., Ashby, M. F., & Worrell, E. The energy required to produce materials: Constraints on energy-intensity improvements, parameters of demand // *Philos. Trans. R. Soc. A Math. Phys. Eng. Sci.* 2013. Vol. 371. DOI: 10.1098/rsta.2012.0003.
11. Graedel, T. E., Allwood, J., Birat, J. P., Buchert, M., Hagelüken, C., & Reck, B. K. What do we know about metal recycling rates? // *J. Ind. Ecol.* 2011. Vol. 15. P. 355–66. DOI: 10.1111/j.1530-9290.2011.00342.x.
12. Graedel, T. E., Harper, E. M., Nassar, N. T., & Reck, B. K. On the materials basis of modern society // *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 2015. DOI: 10.1073/pnas.1312752110.

13. Reck, B. K., & Graedel, T. E. Challenges in metal recycling // *Science* (80-). 2012. Vol. 337. P. 690–5. DOI: 10.1126/science.1217501.
14. Dahmus, J. B., & Gutowski, T. G. What gets recycled: An information theory based model for product recycling // *Environ. Sci. Technol.* 2007. Vol. 41. P. 7543–50. DOI: 10.1021/es062254b.
15. Schlesinger, M. The Recycling Industry // *Alum. Recycl.* 2006. P. 163–70. DOI: 10.1201/9781420006247.ch11.
16. Schlesinger, M. E. Aluminum recycling: Second edition. 2013. DOI: 10.1201/b16192.
17. Wellenreuther, F., Detzel, A., Krüger, M., & Busch, M. Aktualisierte Ökobilanz von Grafik- und Hygienepapier: Spotlight Report / за участі Früh, S., Wagener, R., Grünwasser, S., Wolf, F., Schönheit, E., & Trauth, J. – Heidelberg: ifeu, 2022. – Umweltbundesamt.
18. European Environment Agency (EEA). Investments into the Sustainability Transition [Електронний ресурс]. 2024. – Режим доступу: <https://www.eea.europa.eu/publications/investment-s-into-the-sustainability-transition>.
19. Inui, T. Protecting the global environment: Initiatives by Japanese business. – World Bank Publications, 2002.
20. Bian, J. S., & Zhao, X. Tax or subsidy? An analysis of environmental policies in supply chains with retail competition // *European Journal of Operational Research.* 2020. Vol. 283. P. 901-914. DOI: 10.1016/j.ejor.2020.01.038.
21. Swallow, T. Ellen MacArthur Foundation's Influence on Circular Economy // *Sustainability.* 2024. February 19.
22. Closed Loop Partners. Closed Loop Partners doubles down on investment in Earthodic, advancing coating alternatives for paper packaging // *PR Newswire* [Електронний ресурс]. 2024. – Режим доступу: <https://www.prnewswire.com/news-releases/closed-loop-partners-doubles-down-on-investment-in-earthodic-advancing-coating-alternatives-for-paper-packaging-302303546.html>.
23. Yi, Y., Wang, Y., Fu, C., & Li, Y. Taxes or subsidies to promote investment in green technologies for a supply chain considering consumer preferences for green products // *Computers & Industrial Engineering.* 2022. Vol. 165. P. 108371. DOI: 10.1016/j.cie.2022.108371.
3. Long, A., & Ascent, D. World Economic Outlook. – International Monetary Fund, 2020.
4. Le Quéré, C., Jackson, R. B., Jones, M. W., Smith, A. J., Abernethy, S., Andrew, R. M., De-Gol, A. J., Willis, D. R., Shan, Y., Canadell, J. G., & Friedlingstein, P. Temporary reduction in daily global CO2 emissions during the COVID-19 forced confinement // *Nat. Climate Change.* 2020. Vol. 10, No. 7. P. 647–653.
5. Sharif, A., Saqib, N., Dong, K., & Khan, S. A. R. Nexus between green technology innovation, green financing, and CO2 emissions in the G7 countries: the moderating role of social globalization // *Sustainable Development.* 2022. Vol. 30, No. 6. P. 1934-1946.
6. Afshan, S., Ozturk, I., & Yaqoob, T. Facilitating renewable energy transition, ecological innovations and stringent environmental policies to improve ecological sustainability: evidence from MM-QR method // *Renewable Energy.* 2022. Vol. 196, No. 1. P. 151-160.
7. Sarfraz, M. et al. The relationship between firms' financial performance and performance measures of circular economy sustainability: an investigation of the G7 countries // *Economic Research-Ekonomska Istraživanja.* 2023. Vol. 36, No. 1. P. 2545-2572.
8. Sustainability Satelites [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://energy.sustainability-directory.com/area/circular-energy/>.
9. Shopeju, O. Optimization of recycling processes for industrial metal waste (Bachelor's thesis, Savonia University of Applied Sciences) // *Theseus.* – 2024. – Режим доступу: https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/864572/Shopeju_Olakanle.pdf?sequence=2.
10. Gutowski, T. G., Sahni, S., Allwood, J. M., Ashby, M. F., & Worrell, E. The energy required to produce materials: Constraints on energy-intensity improvements, parameters of demand // *Philos. Trans. R. Soc. A Math. Phys. Eng. Sci.* 2013. Vol. 371. DOI: 10.1098/rsta.2012.0003.
11. Graedel, T. E., Allwood, J., Birat, J. P., Buchert, M., Hagelüken, C., & Reck, B. K. What do we know about metal recycling rates? // *J. Ind. Ecol.* 2011. Vol. 15. P. 355–66. DOI: 10.1111/j.1530-9290.2011.00342.x.
12. Graedel, T. E., Harper, E. M., Nassar, N. T., & Reck, B. K. On the materials basis of modern society // *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 2015. DOI: 10.1073/pnas.1312752110.
13. Reck, B. K., & Graedel, T. E. Challenges in metal recycling // *Science* (80-). 2012. Vol. 337. P. 690–5. DOI: 10.1126/science.1217501.
14. Dahmus, J. B., & Gutowski, T. G. What gets recycled: An information theory based model for product recycling // *Environ. Sci. Technol.* 2007. Vol. 41. P. 7543–50. DOI: 10.1021/es062254b.
15. Schlesinger, M. The Recycling Industry // *Alum. Recycl.* 2006. P. 163–70. DOI: 10.1201/9781420006247.ch11.

References

1. Zupančič, M., Možic, V., Može, M., Cimerman, F., & Golobič, I. Current status and review of waste-to-biogas conversion for selected European countries and worldwide // *Sustainability.* 2022. Vol. 14, No. 3. P. 1823. DOI: 10.3390/su14031823.
2. World cities report: The value of sustainable urbanization. – 2020. – Режим доступу: https://unhabitat.org/sites/default/files/2020/10/wcr_2020_report.pdf.

16. Schlesinger, M. E. Aluminum recycling: Second edition. 2013. DOI: 10.1201/b16192.
17. Wellenreuther, F., Detzel, A., Krüger, M., & Busch, M. Aktualisierte Ökobilanz von Grafik- und Hygienepapier: Spotlight Report / за участі Früh, S., Wagener, R., Grünwasser, S., Wolf, F., Schönheit, E., & Trauth, J. – Heidelberg: ifeu, 2022. – Umweltbundesamt.
18. European Environment Agency (EEA). Investments into the Sustainability Transition. – 2024. – Режим доступу: <https://www.eea.europa.eu/publications/investment-s-into-the-sustainability-transition>.
19. Inui, T. Protecting the global environment: Initiatives by Japanese business. – World Bank Publications, 2002.
20. Bian, J. S., & Zhao, X. Tax or subsidy? An analysis of environmental policies in supply chains with retail competition // European Journal of Operational Research. 2020. Vol. 283. P. 901-914. DOI: 10.1016/j.ejor.2020.01.038.
21. Swallow, T. Ellen MacArthur Foundation's Influence on Circular Economy // Sustainability. 2024. February 19.
22. Closed Loop Partners. Closed Loop Partners doubles down on investment in Earthodic, advancing coating alternatives for paper packaging // PR Newswire. – 2024. – Режим доступу: <https://www.prnewswire.com/news-releases/closed-loop-partners-doubles-down-on-investment-in-earthodic-advancing-coating-alternatives-for-paper-packaging-302303546.html>.
23. Yi, Y., Wang, Y., Fu, C., & Li, Y. Taxes or subsidies to promote investment in green technologies for a supply chain considering consumer preferences for green products // Computers & Industrial Engineering. 2022. Vol. 165. P. 108371. DOI: 10.1016/j.cie.2022.108371

Melnychuk I.V., Voznyi V. Z. Economic aspects of the use of secondary resources and materials in the context of circular energy

The use of secondary resources in the formation of sustainable energy systems is important for the development of a modern economy, as it contributes to reducing dependence on fossil energy sources, reducing environmental pollution and optimizing resource use. The growing demand for energy and depletion of natural resources make circular approaches to energy a

necessity, and the use of waste as an efficient energy carrier and the integration of innovative technologies turn secondary resources into a key element of sustainable development. Modern trends in closed energy systems are focused on the digitalization of energy flow management, the use of artificial intelligence to increase the efficiency of processing secondary resources. An example is the G7 countries that invest in innovative energy-efficient technologies and optimize logistics chains to reduce waste. The Circular Energy concept focuses on the maximum reduction of waste and processing, repurposing and recycling technologies in energy systems, emphasizing the importance of sustainable development. Additionally, effective management of secondary resources allows to significantly reduce greenhouse gas emissions, reduce the burden on natural ecosystems and increase the level of energy independence of countries.

Stimulation of this sector includes tax breaks, subsidies and environmental regulations that contribute to the economic efficiency of the industry. Also, governments and international organizations are developing new regulatory mechanisms aimed at expanding the possibilities of using secondary resources and improving their processing technologies. In particular, investments in research and development contribute to the creation of new materials with improved energy characteristics that can effectively replace traditional fossil resources.

The above aspects emphasize the impact of secondary resources on the formation of sustainable economic models, reducing production costs and increasing energy efficiency in modern industry. The use of circular principles in energy is a key factor in achieving climate goals and ensuring long-term environmental sustainability.

Keywords: circular energy, sustainable development, economic aspects, energy efficiency, business models

Мельничук Іванна Василівна – к.е.н., доцент кафедри прикладної економіки, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
Возний Василь Зеновійович – аспірант спеціальності 051 Економіка, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Стаття подана 13.04.2025.

Наукове видання

**ВІСНИК
СХІДНОУКРАЇНСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО
УНІВЕРСИТЕТУ
імені ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ
№ 4 (290) 2025**

Науковий журнал

Відповідальний за випуск

Лорія М.Г.

Оригінал-макет

Могильна О.В.

Статті надруковано в авторській редакції

Підписано до друку 17.05.2025 р.
Формат 60 x 84 1/8. Папір офсетний. Гарнітура Times.
Друк офсетний. Умов. друк. арк. 11,4. Обл.-вид. арк. 12,8.
Наклад 50 прим. Вид. № 3417. Замов. № __.

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