



# TECHNICAL, AGRICULTURAL AND APPLIED SCIENCES AS MECHANISMS FOR THE DEVELOPMENT OF HUMAN

Collective monograph

ISBN 979-8-89480-692-1

DOI 10.46299/ISG.2024.MONO.TECH.4

BOSTON(USA)-2024

ISBN – 979-8-89480-692-1

DOI – 10.46299/ISG.2024.MONO.TECH.4

*Technical, agricultural and  
applied sciences as mechanisms  
for the development of human  
self-knowledge*

*Collective monograph*

*Boston 2024*

Library of Congress Cataloging-in-Publication Data

ISBN – 979-8-89480-692-1

DOI – 10.46299/ISG.2024.MONO.TECH.4

Authors – Hladyshev D., Hrytsyuk L., Bahdai S., Lemeshev M., Sivak K., Sivak R., Юдін І.І., Sai K., Petlovanyi M., Алмазова О., Kaplin M., Makarov V., Perov M., Bilan T., Shcherbyna Y., Косів Р., Філінська Т., Філінська А., Dets T., Шелкова І., Шматко О., Гамаюн І., Bjartson E., Franz L., Schwarz M., Hossam F., Steven M., Kozachok L., Petrova A., Steven M., Dupont L., Bianchi L., Greco A., Rally J., Zavalniuk Y., Romanyuk O., Novoseltsev O., Кашкевич С.О., Ляшенко Г.Т., Шапошнікова О.П., Маций О.Б., Шишацький А.В., Rusakova T., Zhang L., Lytvyniak Y., Калініченко Є., Заєць А.

#### REVIEWER

Ivan Katerynychuk – Doctor of Technical Sciences, Professor, Honoured Worker of Education of Ukraine, Laureate of the State Prize of Ukraine in Science and Technology, Professor of the Department of Telecommunication and Information Systems of Bohdan Khmelnytskyi National Academy of the State Border Guard Service of Ukraine.

Kostiantyn Dolia – Doctor of Engineering, Department of automobile and transport infrastructure, National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute”.

Published by Primedia eLaunch

<https://primediaelaunch.com/>

Text Copyright © 2024 by the International Science Group(isg-konf.com) and authors.

Illustrations © 2024 by the International Science Group and authors.

Cover design: International Science Group(isg-konf.com). ©

Cover art: International Science Group(isg-konf.com). ©

All rights reserved. Printed in the United States of America. No part of this publication may be reproduced, distributed, or transmitted, in any form or by any means, or stored in a data base or retrieval system, without the prior written permission of the publisher. The content and reliability of the articles are the responsibility of the authors. When using and borrowing materials reference to the publication is required.

Collection of scientific articles published is the scientific and practical publication, which contains scientific articles of students, graduate students, Candidates and Doctors of Sciences, research workers and practitioners from Europe and Ukraine. The articles contain the study, reflecting the processes and changes in the structure of modern science.

TECHNICAL, AGRICULTURAL AND APPLIED SCIENCES AS MECHANISMS FOR THE  
DEVELOPMENT OF HUMAN SELF-KNOWLEDGE

The recommended citation for this publication is:

**Technical, agricultural and applied sciences as mechanisms for the development of human self-knowledge:** collective monograph / Hladyshev D. – etc. – International Science Group. – Boston : Primedia eLaunch, 2024. 483 p. Available at : DOI – 10.46299/ISG.2024.MONO.TECH.4



TABLE OF CONTENTS

1. ARCHITECTURE, CONSTRUCTION		
1.1	Hladyshev D. <sup>1</sup> INVESTIGATION OF METAL SILOS STRUCTURES TO DETERMINE THE CAUSE OF THEIR DESTRUCTION  <sup>1</sup> Department of architectural design and engineering, Lviv Polytechnic National University	9
1.2	Hrytsyuk L. <sup>1</sup> , Bahdai S. <sup>1</sup> FLEXIBILITY OF SPACE: ADAPTING THE ARCHITECTURE OF A YOUTH CENTER TO THE NEEDS OF YOUNG PEOPLE  <sup>1</sup> Department of architectural design and engineering, Lviv Polytechnic National University	19
1.3	Lemeshev M. <sup>1</sup> , Sivak K. <sup>1</sup> , Sivak R. <sup>1</sup> PERSPECTIVES ON THE USE OF TECHNOGENIC RAW MATERIALS IN THE PRODUCTION OF LOW-CLINKER COMPOSITE BINDERS  <sup>1</sup> Department of Construction, Urban Economy and Architecture, Vinnytsia National Technical University, Ukraine	30
2. AVIATION AND SPACE ROCKET TECHNOLOGY		
2.1	Юдін І.І. <sup>1</sup> ТЕНДЕНЦІЇ СВІТОВОГО ДВИГУНОБУДУВАННЯ  <sup>1</sup> кафедра авіаційних двигунів аерокосмічного факультету, Національний авіаційний університет, Київ, Україна	39
3. DEVELOPMENT OF MINERALS		
3.1	Sai K. <sup>1</sup> , Petlovanyi M. <sup>1</sup> COMPREHENSIVE ANALYSIS OF THE EXPERIENCE IN RECYCLING OF COAL MINE DUMPS IN THE CONTEXT OF OBTAINING USEFUL MINERAL RESOURCES  <sup>1</sup> Department of Mining Engineering and Education, Dnipro University of Technology	70
4. ELECTRICAL ENGINEERING		
4.1	Алмазова О. <sup>1</sup> ОБЛАДНАННЯ НА СВІТЛОВИПРОМІНЮВАЛЬНИХ ДІОДАХ ДЛЯ ЕКСТРАКОРПОРАЛЬНОГО ОПРОМІНЕННЯ КРОВІ  <sup>1</sup> Кафедра фізики, Навчально-науковий інститут комп'ютерного моделювання, прикладної фізики та математики, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна.	85

5. ENERGY		
5.1	<p>Kaplin M.<sup>1</sup>, Makarov V.<sup>1</sup>, Perov M.<sup>1</sup>, Bilan T.<sup>1</sup>, Shcherbyna Y.<sup>1</sup></p> <p>A SYSTEM OF MODELS FOR THE TRANSFORMATION OF THE COAL INDUSTRY OF UKRAINE, TAKING INTO ACCOUNT THE PRIORITY OF ENERGY SECURITY CRITERIA</p> <p><sup>1</sup> General Energy Institute of NAS of Ukraine, Kyiv</p>	109
6. FOOD AND LIGHT INDUSTRY TECHNOLOGY		
6.1	<p>Косів Р.<sup>1</sup></p> <p>ТЕХНОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ ВИКОРИСТАННЯ ВІВСА У ПИВОВАРІННІ</p> <p><sup>1</sup> Кафедра технології органічних продуктів, Національний університет «Львівська політехніка»</p>	117
6.2	<p>Філінська Т.<sup>1</sup>, Філінська А.<sup>1</sup></p> <p>ФУНКЦІОНАЛЬНІ ДОБАВКИ ДЛЯ НИЗЬКОЖИРНИХ МАЙОНЕЗНИХ СОУСІВ</p> <p><sup>1</sup> кафедра технологій природних і синтетичних полімерів, жирів та харчової продукції Український державний університет науки і технологій (Дніпро, Україна)</p>	126
7. GEODESY		
7.1	<p>Dets T.<sup>1</sup></p> <p>ОСОБЛИВОСТІ ВПОРЯДКУВАННЯ ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ ТЕРИТОРІЇ ДОВКІЛЛЯ АТОМНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ СТАНЦІЙ</p> <p><sup>1</sup> Department of Geography, Geodesy and Land Management, Pavlo Tychyna Uman State Pedagogical University</p>	137
7.2	<p>Шелкова І.<sup>1</sup></p> <p>НАЗЕМНЕ ЛАЗЕРНЕ 3D-СКАНУВАННЯ ЯК ІНТЕГРОВАНІЙ ПРОЦЕС ВІД ЗБОРУ ДАНИХ ДО СТВОРЕННЯ ТРИВИМІРНИХ МОДЕЛЕЙ</p> <p><sup>1</sup> Кафедра проектування доріг, геодезії і землеустрою, Харківський національний автомобільно-дорожній університет</p>	170
8. INFORMATICS AND CYBERNETICS		
8.1	<p>Шматко О.<sup>1</sup>, Гамаюн І.<sup>1</sup></p> <p>ПРОЄКТУВАННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ СИСТЕМИ ВИЯВЛЕННЯ ТА КЛАСИФІКАЦІЇ РУХОМИХ ОБ'ЄКТІВ У ВІДЕОПОТОЦІ</p> <p><sup>1</sup> Кафедра цифрових технологій та проектно-аналітичних рішень, ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»</p> <p><sup>2</sup> Кафедра Програмної інженерії та інтелектуальних технологій управління, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»</p>	208

9.	<b>INFORMATICS, COMPUTING AND AUTOMATION</b>	
9.1	Bjartson E. <sup>1</sup> , Franz L. <sup>2</sup> , Schwarz M. <sup>3</sup> , Hossam F. <sup>4</sup> , Steven M. <sup>1</sup> , <b>AUTONOMOUS GRASPING CONTROL VIA DEEP LLM IN AEROSPACE ROBOTICS</b> <sup>1</sup> Mechanical Engineering Department, University of Iceland <sup>2</sup> Department of Electric Engineering, University of Craiova <sup>3</sup> Computer Science Department, National Technical University of Athens <sup>4</sup> Aerospace Engineering Department, Cairo University <sup>5</sup> School of Electrical Engineering and Electronic Engineering, University of Johannesburg	244
9.1.1	<b>INTRODUCTION</b>	244
9.1.2	<b>RELATED WORK</b>	246
9.1.3	<b>METHODOLOGY</b>	247
9.1.4	<b>RESULTS</b>	251
9.1.5	<b>CONCLUSION</b>	253
9.2	Kozachok L. <sup>1</sup> <b>МОДЕЛЮВАННЯ ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМ МЕТОДАМИ МАТЕМАТИЧНОГО ПРОГРАМУВАННЯ</b> <sup>1</sup> Department of Computer Science and Information System, Kharkiv National Automobile and Highway University	254
9.3	Petrova A. <sup>1</sup> , Steven M. <sup>2</sup> <b>PEDAGOGY MULTI-DRONE SYSTEM MANIPULATION OF UNKNOWN OBJECT USING DEEP LEARNING</b> <sup>1</sup> Department of Mechanics and Mathematics, Hasselt University <sup>2</sup> School of Electrical Engineering and Electronic Engineering, University of Johannesburg	266
9.3.1	<b>INTRODUCTION</b>	266
9.3.2	<b>RELATED WORK</b>	267
9.3.3	<b>METHODOLOGY</b>	269
9.3.4	<b>RESULTS</b>	272
9.3.5	<b>CONCLUSION</b>	273
9.4	Steven M. <sup>1</sup> , Dupont L. <sup>2</sup> , Bianchi L. <sup>3</sup> , Greco A. <sup>4</sup> , Rally J. <sup>5</sup> <b>DEEP LEARNING-DRIVEN REAL-TIME WHOLE BODY OBSTACLE AVOIDANCE FOR MULTI-DOF REDUNDANT MANIPULATOR IN SPACE</b> <sup>2</sup> School of Computer Science Engineering, University of Galway <sup>3</sup> Physics Department, Université Paris-Saclay <sup>4</sup> Department of Electric Engineering, Università degli Studi di Macerata <sup>5</sup> Department of Aerospace Engineering, Universitat de Barcelona	274

9.4.1	INTRODUCTION	274
9.4.2	RELATED WORK	276
9.4.3	METHODOLOGY	278
9.4.4	RESULTS	281
9.4.5	CONCLUSION	282
9.5	Zavalniuk Y. <sup>1</sup> , Romanyuk O. <sup>1</sup> , Novoseltsev O. <sup>1</sup>  ANALYSIS OF MATERIAL FEATURES FOR RENDERING TASKS  <sup>1</sup> Department of Software Engineering, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, Ukraine	283
9.6	Кашкевич С.О. <sup>1</sup> , Ляшенко Г.Т. <sup>2</sup> , Шапошнікова О.П. <sup>3</sup> , Маций О.Б. <sup>3</sup> , Шишацький А.В. <sup>1</sup>  НАУКОВО-МЕТОДИЧНИЙ АПАРАТ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ОЦІНКИ СТАНУ СКЛАДНИХ СИСТЕМ  <sup>1</sup> Національний авіаційний університет, м. Київ, Україна  <sup>2</sup> Військовий інститут телекомунікацій та інформатизації імені Героїв Крут, м. Київ, Україна  <sup>3</sup> Харківський національний автомобільно-дорожній університет, м. Харків, Україна	296
9.6.1	МЕТОД ОЦІНКИ СТАНУ СКЛАДНИХ ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ З ВИКОРИСТАННЯМ БІОІНСПІРОВАНИХ АЛГОРИТМІВ	297
9.6.2	РОЗРОБКА МЕТОДУ ПОШУКУ РІШЕНЬ З ВИКОРИСТАННЯМ ПОПУЛЯЦІЙНОГО АЛГОРИТМУ ГЛОБАЛЬНОЇ ПОШУКОВОЇ ОПТИМІЗАЦІ	305
9.6.3	РОЗРОБКА МЕТОДУ ПОШУКУ РІШЕНЬ З ВИКОРИСТАННЯМ УДОСКОНАЛЕНОГО АЛГОРИТМУ КОСЯКІВ РИБ	312
9.6.4	РОЗРОБКА МЕТОДУ ПОШУКУ РІШЕНЬ З ВИКОРИСТАННЯМ УДОСКОНАЛЕНОГО АЛГОРИТМУ СТРИБАЮЧИХ ЖАБ	318
10.	LIFE SAFETY	
10.1	Rusakova T. <sup>1</sup>  PREDICTION OF MICROCLIMATE PARAMETERS IN WORKING AREAS WHEN USING A HUMIDIFIER  <sup>1</sup> Department of Life Safety. Oles Honchar Dnipro National University. Dnipro. Ukraine	332
10.2	Zhang L. <sup>1</sup>  ANALYSIS OF WORLD EXPERIENCE IN STATE REGULATION AND REFORM OF THE THERMAL POWER INDUSTRY  <sup>1</sup> Department of Architecture, Civil and Environmental Engineering, Vinnytsia National Technical University/Department of Chemical Engineering, Jiuquan Vocational and Technical College	368

10.2.1.1	REGULATION REFORM AND DEVELOPMENT OF HEATING INDUSTRY IN EUROPEAN COUNTRIES	368
10.2.1.2	REFORM AND DEVELOPMENT OF HEATING INDUSTRY REGULATION IN ASIAN COUNTRIES	373
10.2.1.3	EXPERIENCE OF GOVERNMENT REGULATION OF HEATING INDUSTRY IN FOREIGN COUNTRIES	377
10.2.1.4	SUGGESTIONS ON IMPROVING THE EFFICIENCY OF GOVERNMENT REGULATION IN THE HEATING INDUSTRY	381
11.	MECHANICAL ENGINEERING	
11.1	<p>Lytvyniak Y.<sup>1</sup></p> <p>MANUFACTURING OF SPUR GEARS BY A NEW METHOD OF CONTINUOUS FORMING WITH DISC MILLING CUTTERS</p> <p><sup>1</sup> Department of Robotics and Integrated Mechanical Engineering Technologies, Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine</p>	384
12.	TRANSPORT	
12.1	<p>Калініченко Є.<sup>1</sup>, Заєць А.<sup>2</sup></p> <p>МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ МІНІМІЗАЦІЇ ВТРАТ ПРОЙДЕНОЇ ВІДСТАНІ</p> <p><sup>1</sup> Кафедра навігація і керування судном, Одеський національний морський університет</p> <p><sup>2</sup> Кафедра суднобудування і судноремонту ім. проф. Ю.Л. Воробйова, Одеський національний морський університет</p>	394
	REFERENCES	437

**SECTION 1. ARCHITECTURE, CONSTRUCTION**

DOI: 10.46299/ISG.2024.MONO.TECH.4.1.1

**1.1 Investigation of metal silos structures to determine the cause of their destruction**

The silos to be inspected are located on the territory of the complex of the grain-receiving enterprise in the Khmelnytskyi region. Nine silos are located in a cascade and are connected to each other in a common technological process by galleries above the silos (Fig. 1, 2, 3). Each silo is 27,4 m in diameter, the wall height is 18,7 m, the total height with the dome cover is 27 m.

At the time of the survey, five of the nine silos were destroyed (Figs. 2, 3). Their numbers in order of destruction: #9, #7, #5, #3, #4.

From the time of completion of the construction of the metal silos to their inspection, about five years have passed. More than half of this period has passed since the beginning of the gradual and successive destruction of the structures of their conical coatings.



Figure 1. Aerial photography of the territory of the enterprise in the Khmelnytskyi region, before the destruction of the silos (photo from Google maps)



Figure 2. View of the silos from the southeast, after the destruction of the silos

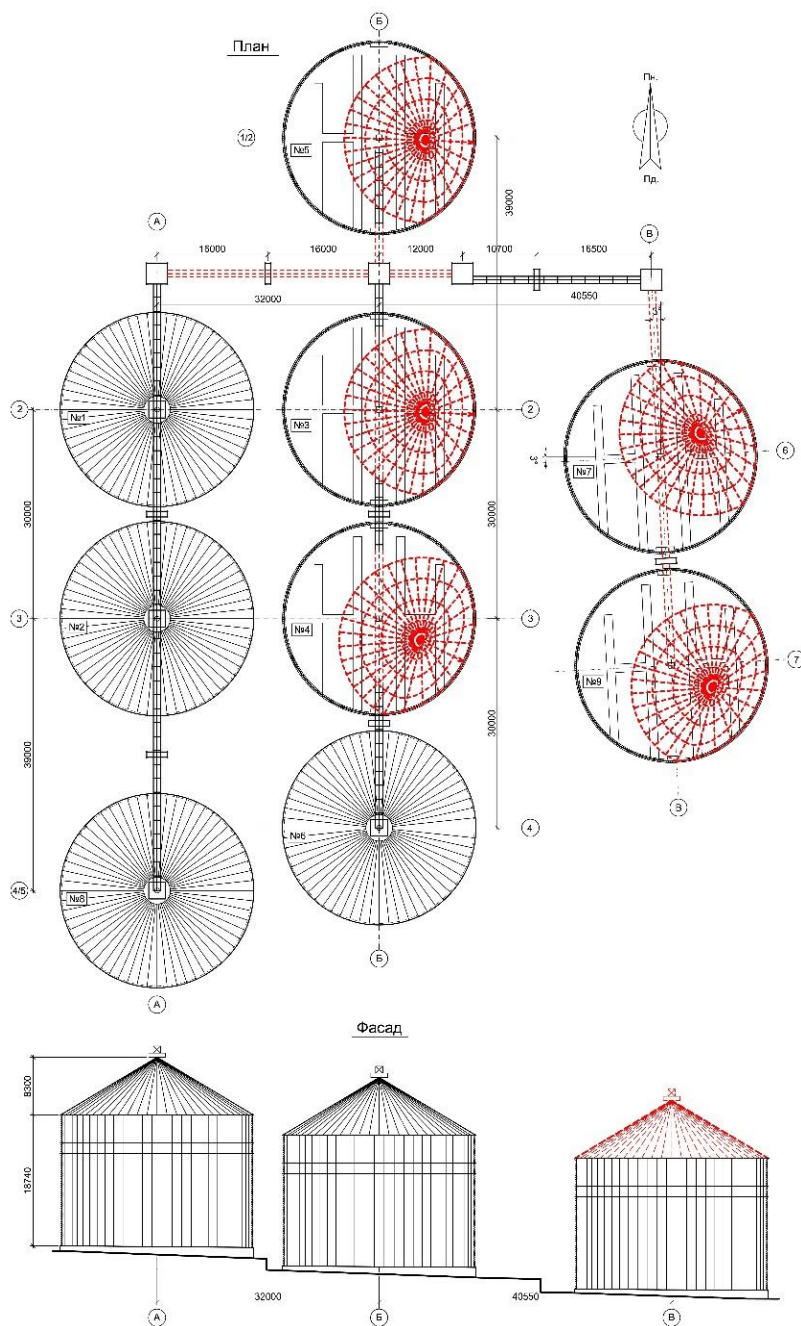


Figure 3. Layout of silos



The technical survey was carried out with the aim of recording the actual nature and directions of destruction of the structures of the conical coverings of the silos, the technical condition of individual structures of the silos, and recording the discovered imperfect technical and design solutions that led to the destruction of the silos.

The expected result of the survey is an assessment of the influence of the slopes of the foundations, the depth of their laying, engineering and geological conditions, territory planning, structural features of the elements of the galleries above the silos and their intermediate vertical supports connected with the silos in one general technological process, on the actual technical condition existing silo facilities.

The results of the examination are necessary to determine the causes of the destruction of the conical coverings of silos and their elements, and to prevent the identified imperfections in the development of design solutions for structures of this type.

The analysis of the available archival documentation made it possible to determine and assess the state of the silo facilities in their pre-emergency period. This analysis included:

- constructive decisions on silos of models 85-09022 and 85-09024 [1] and data on their operational loads;
- schemes of technological combinations of silo structures;
- constructions of foundations of silos;
- design solutions for the location of silo foundations on engineering-geological sections;
- the actual location of silo foundations on engineering and geological sections, taking into account the natural topography of the territory;
- determination and analysis of the directions and values of the maximum slopes of the foundations of all silos;
- determination of the maximum differences in the marks of the opposite sides of the foundations according to the directions of their maximum tilts;
- determination of the maximum and minimum depths for laying the soles of silo foundations in the directions of their maximum slopes.

**Analysis of the vertical movements of the edges of the reinforced concrete ring foundations of nine silos by marking fixed points along the perimeter of their edges to determine the directions of the maximum tilts of the foundations.**

Markings at fixed points along the perimeter of the edges of the reinforced concrete ring foundations of nine silos, to determine the directions of maximum tilts and foundations  $i$ , were taken according to measurements before the destruction of the roofs of the silos (provided by the owner of the enterprise).

The angles of attachment of the beams from the center of the foundation to the marks along their perimeters  $\beta$  are determined. For example, the markings on the perimeters of the foundations for silo #1 and silo #2 are shown in Fig. 4.

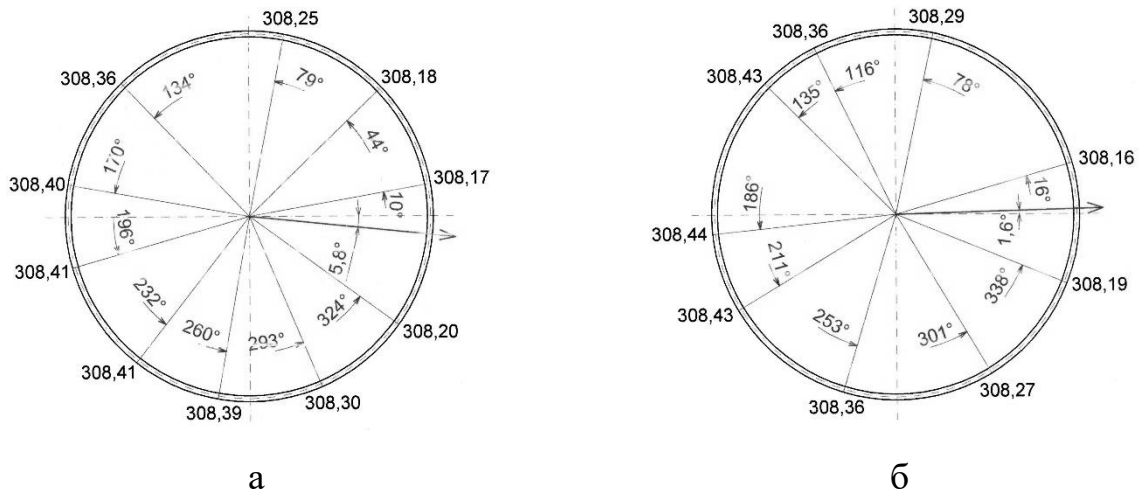


Figure 4. The angle of direction of the maximum inclination of the bank and foundations of the silos: a – #1; b – #2

The values of the angles of the directions of the maximum inclinations (tilts  $i$ ) of the foundations of the silos were determined by the values of the vertical movements of the edges of the foundations of the silos # 1-9 at fixed points located on the rays with angles from the origin of the coordinates in the center of the silos.

The angles of the directions of the maximum slopes of the foundations of the silos were determined according to the method [2] for calculating the values of  $\varphi_{11}$ ,  $c_{11}$ ,  $\gamma_{11}$  at the confidence probability  $\alpha$ , which is accepted for calculations according to the second limit state, which is equal to 0,85. Then, using this formula, we determined the

weighted average value of the angle of the directions of the maximum slopes of the foundations:

$$\beta = \frac{\sum_{i=1}^n \beta_i \cdot h_i}{\left( \sum_{i=1}^n h_i \right)};$$

where:

$\beta_i$  is the value of the angles to the  $i$ th value of the vertical movements of the fixed points;

$h_i$  – marks of vertical movements of the fixed points along the perimeters of the edges of the ring foundations.

**Depths of laying the foundations according to the maximum directions of the slopes of the foundations.**

The calculation of the foundation laying depth is performed according to the norms [2] and taking into account the standard [3]. The normative depth of seasonal soil freezing for silos is  $d_{fn}=0,77$  m, the estimated depth is  $d_f=0,847$  m.

The design of the bases and foundations must include measures that prevent the soil of the base from becoming wet, as well as freezing during the construction period. At the same time, the level of groundwater should be taken taking into account its forecast for the period of operation of the structure and the impact of water-reducing measures on it, if they are foreseen by the project.

The foundations of the structure or its compartment must be laid on the same level. If it is necessary to lay adjacent foundations at different marks, their permissible difference  $\Delta h$  is determined based on the condition:

$$\Delta h \leq a \cdot \left( \operatorname{tg} \varphi_I + \frac{c_I}{p} \right),$$

where:

$a$  is the distance between the inner faces of the foundations;

$\varphi_I$  and  $c_I$  are calculated values of the angle of internal friction and specific soil adhesion, respectively;

$p$  is the average pressure under the sole of the foundation located above from the calculated loads (for calculating the foundation based on its bearing capacity).

As you can see, requirement of norms [2] is not taken into account in the territory planning project, and the depths of the foundations of silos #2 ( $d=0,745$  m) on the eastern side and #3 ( $d=0,4$  m) on the northern side are smaller for the depth of freezing.

An analysis of the provision of the actual horizon of foundation cuts on all silos based on the root-mean-square deviations from the straight (conditional design plane) values of the absolute marks by straight-line approximation was performed. The approximation line shows the weighted average slope of each silo.

We determined the minimum and maximum depth of foundation laying  $d$  (from the opposite sides of the silos). The actual differences in the  $\Delta S_{\phi}$  marks were determined in the direction of the maximum slope of the foundations. Limit slopes of the foundations were taken as  $i_u = 0,004$ .

#### **Determination of the technical condition of structures.**

The assessment of the technical condition of the silo structures was carried out based on a set of data: analysis of available archival documentation, measurements of the structures, results of visual and instrumental inspection, photos of the condition of the silo structures after their construction and during the period of gradual destruction of their coatings, determination of concrete strength characteristics, assessment of the impact of defects on the condition of structures and their corresponding assessment and classification at the time of inspection by categories of technical conditions [4].

The general technical condition of silo foundations can be attributed to "3" category of technical condition.

The general technical condition of the bottoms of the silos can be attributed to the "3" category of technical condition.

Metal cone coverings of silos #9, 7, 5, 3, 4 are in the "4" category of technical condition, emergency.

Part of the metal trusses of the galleries above the silos are in the "4" category of technical condition, emergency, and some are in the "3" category.

Part of the metal structural and load-bearing elements of the intermediate

supports of the galleries above the silos, which are standing separately, have structural and strength defects in the nodes of fastening of braces and braces to the racks, as well as the absence of braces and braces since installation. They are in the "3" category of technical condition.

The walls of silos #9, 7, 5, 3, 4 are in the "3" category of technical condition.

During the survey, the rigid attachment of the spatial lattice trusses above the silo conveyor galleries to the central ring of the conical coverings (Fig. 5) was recorded through a "chair", which is a faulty technical solution.



Figure 5. Rigid fastening of the lattice trusses of the conveyor galleries above the silos through the "chair" to the central ring of the conical cover

The foundations of the intermediate vertical supports of the galleries above the silos, which are connected to the foundations of the silos with different stiffness, with significant and different directions of the foundations of individual silos connected by inseparable galleries, affected the destruction of the coatings.

Some structures of intermediate supports are overloaded or have significant defects, damage, unreliable execution, which indicates an unconditional decrease in their bearing capacity and the need for repair. Part of the load-bearing elements of the intermediate supports above the silo galleries are in the 3rd category of technical condition (Fig. 6). This is due to the fact that the lattice structures of the intermediate vertical supports of the galleries have structural and strength defects in the nodes of fastening of braces and braces to the posts, as well as the absence of braces and braces since installation.

Photofixation of structural and load-bearing elements of silos was carried out,

which helped to assess the impact of defects and damage on the sequence of destruction of silo coatings (Fig. 7) and the silos themselves.



Figure 6. Lattice vertical rack between silos #4 and #6 and continuous lattice truss of the conveyor gallery



Figure 7. Hanging of the destroyed elements of the load-bearing structures of the conical coverings of silo #5 on the contour of its wall

### **Conclusions.**

Based on the analysis of archival data and taking into account the data of the survey, it was established that the soles of the eastern side of the foundations of the silos rest on layers of soil that can be classified as bulk, since their physical and mechanical characteristics are not identified and specified in the engineering and geological report.

The lack of drainage from the inner sides of the retaining walls and the absence of drainage trays along the retaining walls were established. The actual planning of the site showed that the conditions of the closed areas around the silos contribute to the accumulation of water in the soils under the foundations of the silos, taking into account the slope of the soil layers and their reduced filtration coefficient. At the time of the survey, the actual planning of the territory around the silos does not correspond

to the design decisions.

Analysis of the calculations showed that the lower the silos are located in the cascade, the greater their tilt, even with a greater depth of foundation laying on the eastern side of the silos. The smaller the depth of foundation laying on the eastern side of the silos, the greater the increase in deformations of the base and tilting of the foundations of silos located at the level of one cascade, regardless of the condition of the silos themselves.

Based on the above data, we came to the conclusion that the cause of the beginning of the destruction of all silos is a significant inclination of the foundations of silos #9 and #7 towards each other, which caused significant forces from the movements of the tops of the conical coverings of silos #7 and #9, which are directed toward each other to the second.

The reason for the destruction of silo #9 in the first place is its falling component of the slope towards silo #7 and the elastic support of the gallery truss above the silos on the first intermediate corner support. An intermediate corner support is located on the northern side of silo #7, to which one end of the gallery's continuous truss is fixed. The continuous truss of the gallery along its length has three more supports: the top of the cover of silo #7; intermediate support between silos #7 and #9; top of silo cover #9. The continuous truss of the gallery was rigidly fixed to the tops of the conical structure of silo covers #7, 9 and had sufficient longitudinal rigidity to transmit and redistribute forces from the total horizontal movement of the tops of silo covers #7 and #9 towards each other. The total horizontal movement is:

$$\Sigma U_x = U_{7x} + U_{9x} = 89,13 + 104,89 = 194,02 \text{ mm.}$$

The directions of horizontal movements of the tops of the conical covers of silos #7 and #9, which are directed toward each other, are components of the recorded maximum tilts of the foundations of these silos.

Vertical movements (directed downwards) of the tops of the conical coverings: silo #7 –  $(-U_{7z})=45,8$  mm; of silo #9 –  $(-U_{9z})=54$  mm.

The destruction of the cover of silo #9 caused a chain horizontal reaction through the trusses of the galleries above the silos, fixed on intermediate supports, which



successively led to the deformation of the supporting elements of the conical covers and their gradual successive destruction under the influence of the accumulation of a complex of factors: inconsistencies in the slopes of the foundations of various silos with the horizontal movement of the trusses of the conveyor galleries; differences in the average vertical movements of silo foundations at the level of one terrace and different terraces; uneven snow loads and ice loads on deformed roofs of silos.

## **1.2 Flexibility of space: adapting the architecture of a youth center to the needs of young people**

**Problem statement.** Today, young people have access to a multitude of leisure opportunities, but not all of them have a positive impact on their formation and are useful for personal development.

The topic of transforming youth centers in a modern urban environment is extremely relevant. Changing needs of youth, development of technologies and new approaches to education and upbringing require rethinking traditional models of youth spaces. One of the problems facing Ukrainian youth today is a low level of civic engagement. According to the "Youth of Ukraine 2015" study, only 2% of young people are members of public organizations, and 62% did not participate in any civil society activities at all during the year.[6]

This study is aimed at analyzing the impact of architectural and planning decisions of youth centers on the behavior and well-being of young people, with an emphasis on their integration into the urban environment and the creation of a motivational space for young people. Flexibility and openness are considered as a way to adapt space to the needs of young people, in order to involve them in activity in youth centers. Architectural solutions that can work and strengthen the idea of the organization itself, as well as arouse the interest of the young person, are also considered.

The purpose of the article: to show the connection between the architectural and planning component of youth centers and the involvement of young people in such centers.

### **Analysis of recent research and publications.**

On the "Hromadskyi Prostir" portal, an article titled "Youth Civic and Political Activity: Current Realities" has been published, presenting statistical data on youth civic engagement.

The manual "Youth Policy in United Territorial Communities within the Framework of the 'Youth Worker' Program" outlines reforms introduced since 2014, aimed at creating favorable living conditions for young people in communities. The key goal of these changes is to provide opportunities for self-realization and youth development locally, thus minimizing migration. As part of this program, an article titled "A Brief History of Youth Centers" was created, which examines the main stages in the formation of modern youth centers.

The manual "Youth Centers in Ukraine" addresses the creation of youth centers based on the principle of decentralization.

In 2020, the analytical center Cedos released findings from a study on the leisure and cultural needs of urban youth in Ukraine, conducted with the support of the Ukrainian Cultural Foundation. The research focused on youth in large Ukrainian cities.

The work "Youth Policy in United Territorial Communities" provides examples of forms of youth policy.

The brochure "Youth Centers in Ukraine" offers informative insights into current trends in the development of youth centers.

The manual "Standards for Youth Centers", developed by IREX and the NGO "Youth Platform" as part of the "Dream and Act" program, explores the important topic of architectural and planning principles for creating youth centers.

The methodological recommendations "Youth Centers: Basic Principles and Foundations" highlight approaches to creating youth centers and define the minimum set of spaces required for such facilities.

The guide for local authorities and communities, titled "How to Create a Community Space: Step-by-Step Instructions", delves into the topic of public spaces and their integration with the internal setup of youth centers.

**Research results.** The history of youth spaces goes back to ancient times. Even in ancient times, there were institutions similar to modern youth centers. Roman colleges were places where young people could not only relax, but also study and participate in social life.

Later, in different historical periods, various clubs and associations emerged that brought people together around common interests and values. Such communities often had a creative nature and played an important role in the cultural life of society.

At the beginning of the 20th century, in parallel with the emergence of youth policy, the first spaces specifically created for the needs of young people began to appear. One of the first examples of such spaces was the scout houses that appeared in Britain and the USA. These cozy places not only served as a base for scouting activities, but also became the first youth centers in the modern sense. They offered young people a place to meet, study and develop leadership qualities. [7]

In parallel with scouting, other youth movements also developed. For example, in the USA, a corn club for youth emerged, which later turned into a large-scale 4-H movement. This club, which initially united young farmers, gradually expanded its activities and became one of the most influential.

A significant contribution to the development of the concept of youth centers was made by student fraternities in the USA. These closed communities built their own houses where students could live, study and relax. Student fraternities became a model for many youth organizations, demonstrating how important it is to have your own space for self-realization.

Scouting left a special mark on the history of youth centers. Swedish scout houses of the interwar period became real legends. Their interior, with bear skins and other elements of forest life, created an atmosphere of comfort and closeness to nature. It was this style, known as "Scandinavian", that later became one of the most popular directions in the design of youth centers.

After the end of World War II, the successful experience of scouting and other youth movements prompted the creation of larger and more accessible youth spaces. There was a need to provide conditions for self-development and leisure not only for a limited circle of young people, but also for broad segments of the population.

This trend was reinforced by the values of the baby boomer generation, who sought self-realization and active participation in public life. One of the striking examples is Copenhagen's "Christiania" - a self-governing district created by young

people. Despite numerous attempts by the authorities to disperse this informal neighborhood, it successfully exists to this day, demonstrating the viability of youth initiatives.

A network of youth institutions was also actively developing in Western Ukrainian territories. The Scouts, a national-patriotic youth organization, created their own homes and camps. In parallel, Ukrainian students abroad united around academic buildings, such as the one built in Lviv with the funds of the philanthropist Yevhen Chykalenko. These buildings became centers of Ukrainian student life, contributing to the preservation of national identity and the development of leadership qualities.

Similar academic buildings existed in other European cities, in particular, in Prague and Danzig. They not only provided students with housing, but also created conditions for communication, study and cultural leisure. An interesting feature of such buildings was the combination of the functions of a dormitory, a dining room and a cultural center, where students could independently organize their lives.

A modern youth center is primarily an institution (in large cities - a network of local branches), the work of which is aimed at creating appropriate conditions for the development of youth, providing a wide range of services to young people, ensuring their meaningful and high-quality leisure.

Special attention is paid to the development of youth infrastructure at the level of territorial communities.

The development of youth infrastructure involves decentralization, which includes the creation of multifunctional youth centers, which should become not only places for leisure, but also platforms for learning, creativity, social interaction and entrepreneurship development. Direct participation of young people in the development of the center concept will allow creating a space that best meets their needs and expectations.[8]

Most young people in large cities spend their non-working time on passive recreation: at least once a week they use the Internet (82%), listen to music (67%), watch videos (55%) and television (50%). Comparatively, much fewer young people

visit cinemas (14%), concerts, theaters and art exhibitions (5% each) at least once a month.

Various factors influence the leisure of young people: the field of employment and working conditions, the amount of free time, income level, gender, age, place of residence, the availability and accessibility of infrastructure for recreation and leisure. Today's youth increasingly face unstable work schedules and blurred boundaries between work and leisure. Remote work and freelancing blur the lines between office and home, and creative professions often require full commitment, blurring the line between work and hobby. Those working in the service sector are often deprived of the opportunity to relax on weekends and holidays, which limits their leisure time.[9]

Youth centers are one of the forms of work with youth. The concept of youth centers is based on the idea of creating an open space where young people could freely spend time, develop their talents and interests, and communicate with like-minded people. This is not just a physical space, but a place where every teenager or young person feels comfortable and safe.

Why is so much attention paid to the creation of such centers? The fact is that youth centers play an important role in shaping the future of society. They contribute to the development of such important qualities as independence, responsibility, tolerance, creativity and initiative. In addition, youth centers help young people adapt to changes taking place in society and find their place in life.

Today, in the conditions of decentralization and the need to optimize budgets, many communities are faced with the problem of choosing: which institutions for youth to keep and which to close. In such conditions, youth centers can be an effective solution. They allow you to combine various areas of youth work under one roof, optimize costs and create a more flexible system that can quickly adapt to the changing needs of young people.

In this context, youth centers become a promising solution. They can become a logical continuation of the educational process, offering young people various opportunities for development and self-realization.

A relatively new form of work with youth is the creation of hubs, coworking spaces based on existing spaces, where young people can freely spend time depending on their needs.

The creation of such spaces does not require significant financial costs. They can be organized on the basis of existing premises, such as libraries, cultural centers or even unused buildings. Their main feature is accessibility for young people and ease of use.

The main service provided by hubs and coworking spaces is the provision of premises and necessary equipment that young people can use independently for learning, creativity, holding meetings, etc. This allows young people to feel like masters of the situation and develop their initiative.

In addition, they are an ideal platform for public organizations and initiative groups working with young people. Such spaces provide an opportunity to hold various events, trainings, workshops and other events at an affordable cost.

Another form of work with young people is tent camping. The roadmap for reforming youth policy emphasizes the importance of tent camps as an effective and economical way to organize youth leisure. This format allows you to combine various activities, from sports to education, and attract more young people.[10]

**Organization of youth centers.** On the initiative of regional councils and state administrations, 17 regional youth centers were created in 2017. There is also a tendency to transform youth labor centers into general-type youth centers, which allows expanding the range of services and covering a larger number of young people.

The creation of multifunctional spaces for youth is becoming increasingly important in the modern world. Architects working on the design of such spaces must take into account not only aesthetic aspects, but also pedagogical, social, psychological and economic features of the youth environment.

By creating various opportunities for leisure, self-realization and development, the architecture of youth space encourages adolescents to move from the passive role of observers to active participation in the life of society. This approach contributes to the formation of responsible and independent personalities.[8]



**Requirements for youth center premises.** The location of the youth center should be as convenient as possible for young people. The ideal option is an area where most potential visitors live, study or work. In addition, it is important that the center is easily accessible by public transport.

If the center is located in the same building as other institutions, it is advisable to provide a separate entrance so that young people feel their autonomy. However, if this is not possible, the center's staff should have access to all entrances and exits of the building.

As for the area, the minimum permissible figure is 60 square meters. The center's premises should not be located in the basement or ground floor. The intended purpose of the youth center's premises is non-residential. It should be bright, spacious and meet sanitary standards. The recommended minimum height of the premises is 3 m.

At the entrance, it is necessary to provide parking spaces for bicycles, scooters and other vehicles. In the summer, the center should organize events in the adjacent territory, using it for educational or leisure activities. Access to the center should be barrier-free, with ramps or other adaptations. Sanitary and hygienic premises must be accessible to persons with reduced mobility and have appropriate pictograms.

The premises of the youth center must comply with sanitary standards, in particular the requirements of DSanPiN 3.3.2.007-98, providing a minimum of 6 m<sup>2</sup> per workplace of administrative staff. The minimum area for visitors is determined at the rate of 2 m<sup>2</sup> per person. Bathrooms, at least two, must be located on the same floor as the center.

To determine the required premises of a youth centre, it is first necessary to determine the range of services that the centre will provide.

It is important to choose those services that correspond to the local/regional/national situation and available resources.

To ensure the success of such a centre, it is worth starting with a small set of services and developing further, rather than starting from everything at once. Therefore, the first stage is important to decide on the main primary services that the

youth centre will provide. The second stage is additional services, which will depend on the further wishes of visitors and the availability of resources.[11]

The number of premises required and their location depends on the services that the centre will offer.

The following conditions must be provided in the youth centre:

- The building must be located in a familiar and easily accessible place for young people.

- It is necessary to provide a reception area with a place for placing information materials, a registration desk, chairs and tables for communication and viewing materials, public internet terminals and computers, a photocopier, a place for welcoming meetings with groups.

- It is important to design one or more rooms for staff meetings, group work, interviews or consultations.

- Inclusivity

- A room for the director and/or administration,

- the room should be equipped with a kitchen and toilets.[12]

In addition to the building itself, the environment in which it is located and the communication between the internal and external space are important. Public space is a space of social activity: communication and representation, reflecting the socio-economic and political model of society. Also an interesting solution is a dynamic public space, the use of which can be different at different times of the year, week, day, etc.[13]

Using the example of the youth center "Ukrainian Youth for Christ" in Lviv, the use of basic architectural and planning principles for the creation of such structures is considered (Figure 1). This project is a reconstruction of the existing premises of the youth center "Ukrainian Youth for Christ". The building consists of two floors, the first of which is the youth center premises, and the second is residential. The building is located in the central part of the city on Pekarska Street and is surrounded by residential buildings. It consists of two parts: the first is the youth center itself, the second is a sports hall and abandoned garages. According to the initial data, the building does not

have window openings from the north and west. The concept was taken as openness and multifunctionality of the premises. A large number of partitions that formed small rooms were demolished. Since the youth center is small in area (248 sq m), the principle of greater concentration of people was chosen, for this purpose numerous partitions were removed that divided the space into small rooms that were never filled with people at the same time. Thus, the youth space itself is divided into three main blocks.

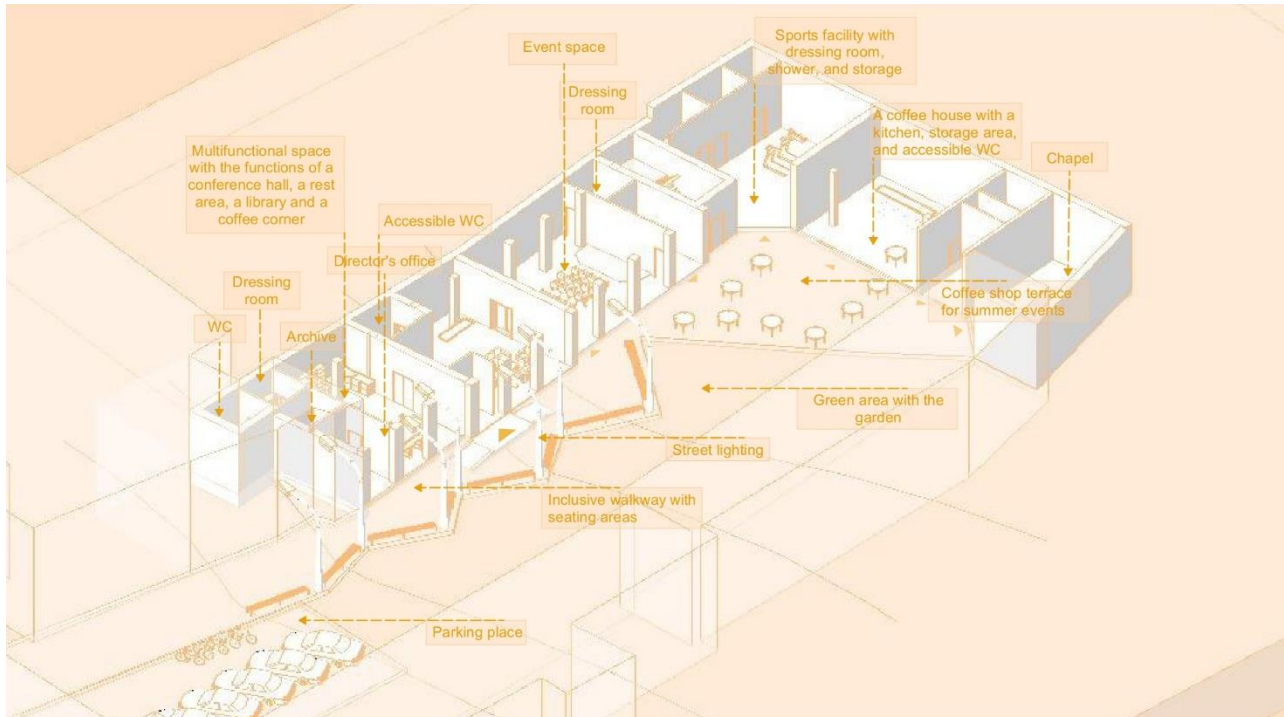


Figure 1. 3D Functional Zoning Diagram of the Youth Center 'Ukrainian Youth for Christ' in Lviv, Ukraine. Drawing by Sofiia Bahdai

The main entrance block, located in the middle, consists of an entrance area, a reception area and a relaxation and waiting area, as well as an inclusive bathroom. The second side block is a multifunctional space for the members of the organization itself: it consists of an open space that combines a conference room, a game area, a relaxation area, a library and a cafe corner, as well as closed rooms such as the room of the head of the organization, an archive room, a wardrobe, and a toilet. Another side block is an assembly hall for large events with a stage, a dressing room for artists and rooms for storing equipment and technology. The second part of the building also consists of three functional blocks. The first block is a sports block, the function of which has been

preserved. The second block consists of former garages, which will function as a café. The third block consists of a former corner garage, which will take on the function of a chapel, which the organization needs in accordance with its Christian orientation.

Regarding the courtyard, it was decided to make it dynamic, which would be a meeting and recreation place not only for the organization's members, but also for the residents. The existing trees and gardens, which were organized and maintained by the residents, were preserved. The road that led to the former garages was decided to be pedestrianized in order to eliminate the possibility of parking and driving directly near the premises. At the same time, a parking area was designed on the south side. The pedestrian path is inclusive, the right part of which forms triangles that serve as areas for communication and recreation, as well as additional tree placement. At the same time, the path smoothly transitions into a terrace on the north, which serves as a summer recreation area near the cafe, as well as a space for exhibitions and open-air dances.

**Conclusion.** A modern youth center is not just a static institution, but a dynamic organism that is constantly evolving and adapting to the changing needs of young people. To create such a space, it is necessary to take into account a number of important factors, among which flexibility and youth orientation are key.

Flexibility involves creating a space that can be easily adapted to different types of activity. Modular furniture, transformable spaces and the use of technologies that allow changing the functional purpose of the premises are necessary elements of a modern youth center. Such flexibility allows the center to respond to the changing interests of young people and provide a variety of programs and activities.

Youth orientation means that the youth center should not be just a place for leisure, but a platform for the implementation of their ideas and initiatives. Involving young people in the process of developing the concept of the center and its programs is key to success. Regular surveys, focus groups and other methods of collecting young people's opinions ensure that the center meets their needs and interests.

From the 20th to the 21st century, the role of the youth center has changed significantly, as has the attitude towards youth: from the approach of involving youth

in the youth space as a solution to the problem of youth being on the streets in an unfavorable environment to a more conscious approach to youth as a value of society.

As a result, the following main recommendations were formed, which should be taken into account in the architecture of youth centers:

- Integration of the building into the environment
  - Creation of multifunctional spaces
  - Use of natural resources
  - Consideration of the principles of sustainable development
  - Adaptation of old spaces to modern requirements
  - Combination of leisure, educational and business functions
  - Inclusivity
  - Modularity as an element of multifunctionality and work for the future
  - Autonomy
  - Orientation to the personality and individuality of visitors
  - Volumetric planning solutions based on the principle of dispersion and activation
- Creation of opportunities for solitude
  - Physical and psycho-emotional comfort
  - Combination of external space with internal

### 1.3 Perspectives on the use of technogenic raw materials in the production of low-clinker composite binders

At present, approximately 3 billion tons of binders are produced globally, the majority of which is accounted for by Portland cement. Its production consumes about 400 million tons of conventional fuel, while CO<sub>2</sub> and dust emissions into the environment amount to approximately 2.5 billion tons (table 1) [14-15]. In light of these environmental concerns, the construction materials industry has recently shifted towards concretes with reduced cement consumption. In the United States and Europe, this category includes concretes in which cement usage is reduced by 50 –60%. This reduction is mainly achieved through the use of blended binders, where a portion of the cement is replaced by fly ash, slag, or silica fume.

Table 1

Production Indicators of Binders Worldwide

№	Type of binder	Total production worldwide, million. t	Energy consumption, kg/unit production		Harmful emissions			
					CO <sub>2</sub>		Dust	
			per 1 t	Total (million t)	(kg/t)	Total (million t)	(kg/t)	Total (million t)
1	Portland Cement	2540	150	381	850	2159	21	53,34
2	Lime	286	204	58,34	528	151	5	1,43
3	Gypsum	112	47	5,264				
Total:		2938		444,6		2310		54,77

According to current global trends, composite binders (including composite cements and binders based on industrial waste) are gaining increasing importance as alternatives to traditional binders. Of particular interest are binder systems containing a limited amount of clinker [16-18].

The potential for resource conservation through comprehensive raw material processing and waste utilization is significant. Capital investments required for processing secondary raw materials are approximately four times lower than those

needed for products derived from primary raw materials [19-20]. It is evident that investments should focus on waste-free technological processes that conserve raw and energy resources while ensuring high product quality [21-22].

The construction materials industry is the largest consumer of industrial waste, with raw materials accounting for 50% or more of the production cost. Many types of waste have compositions and properties similar to those of natural raw materials [23]. Studies have shown that the use of industrial waste can meet up to 40% of the construction sector's raw material needs and reduce the cost of building materials production by 10 – 30% compared to production using natural raw materials. Additionally, new construction materials with high technical and economic performance can be derived from industrial waste [24-28].

Traditionally, in modern recycling technologies for industrial waste, the primary direction of processing phosphogypsum stockpiles is the production of construction materials. The technologies for producing phosphogypsum-concrete construction materials involve the preparation of multi-component raw material mixtures. These mixtures typically include cement, lime, tripoli, slags, ash, expanded clay dust, and other components containing silicates, aluminates, and alumoferrites.

The hydration products and their interaction with calcium sulfate form water-resistant compounds within the structure of the resulting material. An essential requirement for the development of phosphogypsum-containing binders and mixtures is the creation of chemical and technological conditions that prevent the formation of highly basic calcium hydroaluminate sulfate ( $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 3\text{CaSO}_4\cdot 31\text{H}_2\text{O}$ ) [29-30]. Slags, ashes, opoka, and tripoli are considered reactive silica-containing fillers because, in the presence of phosphogypsum, they interact with lime and cement to form hydrated compounds and complex hydrous phases that differ from the typical cement hydration products known as hydrosilicates [31].

The accumulated scientific and practical experience of using industrial waste in Ukraine and abroad allows it to be regarded as a valuable raw material for the production of construction materials [32-33]. Industrial waste can be divided into two main groups: mineral and organic, with the former being more advantageous due to its



abundance, better research, and significant importance in construction material production.

When developing economically viable approaches to utilizing industrial waste for construction materials, several factors must be considered: the initial state (chemical activity, dispersity, and aggregate state), and the choice of technology with minimal preparation and processing [34-35]. It should also be noted that the selection and justification of utilization methods are tasks for technologists, while ecological and sanitary services are responsible for conditioning and compliance with storage regulations. The key parameters characterizing any industrial waste include: chemical-mineralogical composition; aggregate state; volume. Each type of waste must undergo multiple levels of evaluation based on these criteria to determine its potential applications [36].

In practice, virtually all primary construction materials can be produced from waste or a combination of waste and natural mineral raw materials [37-38]. High-volume waste from the energy and chemical industries (e.g., phosphogypsum, titanogypsum, fluorogypsum, citrogypsum, desulfogypsum) can be used to manufacture construction materials, products, and structures for residential, industrial, agricultural, and infrastructural projects. Therefore, Ukraine's current focus on using industrial waste and local materials for construction promises significant benefits [39].

An analysis of scientific studies and practical experience with ash-slag waste indicates the economic feasibility of using thermal power plant (TPP) waste in cement and complex multi-component binder production. The content of  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$ , and  $\text{MgO}$  significantly affects the basic physicochemical properties of construction products. Research has shown that the fly ash from Ladyzhynska TPP is particularly suitable for improving the physicochemical and physico-mechanical characteristics of construction products [40-41]. Due to its chemical composition, it is classified as a basic ash, positively influencing structure formation processes. Table 2 presents the chemical composition of the fly ash from Ladyzhynska TPP.

Table 2

Chemical composition of Ladizhin TPP fly ash

Oxide content	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	P.P
Ash slags from Ladizhin TPP	49,26	23,00	19,35	3,53	1,79	2,11	0,40	0,10	1,40
Fly ash from Ladizhin TPP	52,1	23,1	15,6	3,16	1,08	0,4	1,2	0,57	0,7

It is essential to consider that an excessive ash content in ash-based materials increases porosity, reduces the rate of strength development over time, and negatively affects performance characteristics, such as frost and corrosion resistance. To prevent these undesirable effects, complex multifunctional additives are introduced into the concrete mix. These additives not only influence the kinetics of strength gain but also shape the material's structure, significantly affecting the physical-mechanical properties and durability of the resulting artificial stone [42-43].

The amount of ash used in the composition of complex binder concrete mixes can be increased through activation. The choice of activation method depends on the chemical-mineralogical composition of the ash, its production process, and the binder system composition. Since ash serves multiple functions in concrete mixes, its quantity can be increased by using various activation methods and exploiting its multifunctionality. Incorporating ash as a binder component, microfiller, or fine aggregate contributes to forming a stronger interfacial transition zone. Studies [44] have established a relationship between types of fuel ash and slag, activation methods, and their potential use in construction materials and products. Table 3 provides the names of various thermal energy production wastes, their activation methods, and recommended applications in construction materials and products.

Phosphogypsum waste is a byproduct of phosphoric acid production via the extraction process. Depending on the temperature-concentration conditions of phosphate raw material decomposition, the solid phase of calcium sulfate can exist in one of three forms: dihydrate, hemihydrate, or anhydrite. Phosphogypsum waste is classified as a gypsum raw material since it consists of 80–95% calcium sulfate. The

chemical composition of phosphogypsum from the Vinnytsia Chemical Plant "Himprom" is presented in Table 3.

Table 3

Chemical Composition of Phosphogypsum from the Vinnytsia Chemical Plant  
"Khimprom"

Main components	Content, % by mass	
	Phosphogypsum dihydrate	Phosphogypsum pentahydrate
Total P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.5-1.5	1.2-1.5
Water-soluble P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.1-0.7	0.7-2.0
CaO	22-23	25-28
SO <sub>3</sub>	38-39	45-47
F	0.1-0.2	1.2-1.5
Hygroscopic water	21-29	18-22
Crystalline water	19-21	5,5-6,5

The bulk density of phosphogypsum is variable and depends on factors such as moisture content, particle size distribution, and degree of compaction. Phosphogypsum is a highly compressible material, and its compression results in reduced porosity and displacement or redistribution of moisture. The total moisture content of phosphogypsum is approximately 66%. Its maximum molecular moisture, about 15–16%, reflects the material's ability to retain water through molecular adhesion between phosphogypsum particles and water.

Several specific characteristics hinder the widespread use of phosphogypsum: its physical state, high moisture content, the presence of phosphoric and sulfuric acids, and water-soluble harmful phosphorus and fluorine compounds. Residual free phosphoric and sulfuric acids, as well as soluble salts like monocalcium phosphate and dicalcium phosphate, delay setting and reduce the strength of cementitious binders [45-46]. The emission of fluorine gases during thermal processing complicates the production technology of construction materials. The elevated acidity of raw phosphogypsum contributes to equipment corrosion, and newly formed sodium, potassium, and calcium sulfates tend to crystallize on the surface of products as efflorescence during drying. Consequently, the use of untreated phosphogypsum

complicates the production of gypsum binders with satisfactory mechanical properties. Acid residue concentrations can be reduced by washing, but this requires additional resources and generates acidic wastewater that must be treated.

Phosphogypsum has been studied as a raw material for gypsum binder production and as an additive for regulating the setting time of cement paste. However, due to its technological limitations, such as the need for drying and briquetting, phosphogypsum utilization has primarily been adopted in countries lacking natural gypsum deposits. For example, in Japan, all phosphogypsum is utilized in the cement industry.

Theoretically, zero-waste phosphogypsum utilization can be achieved through complete thermal decomposition of calcium sulfate into CaO and SO<sub>2</sub>. The resulting SO<sub>2</sub> can be used for sulfuric acid production, while CaO can be applied as quicklime or in Portland cement clinker production. However, this process requires extremely high temperatures exceeding 1450°C, which is a significant drawback of the technology [47-48].

Among the existing methods for improving the efficiency of hydraulic interactions between components of molding solutions and active mineral additives, mechanical activation through preliminary grinding is the most common. The presence of free acids in phosphogypsum allows for their use in chemical activation, primarily of fly ash, as a component of low-clinker phosphogypsum-fly ash cementitious binders. The destruction of glassy films on the surface of fly ash will significantly enhance its hydraulic activity.

It is well known that the application of active mineral additives in the production of hydraulic binders is driven by several critical reasons: the need to impart special properties to cement, saving fuel and energy resources, and improving the ecological balance of processing industries through recycling industrial waste. In the existing production technologies of building materials, natural additives and products derived from industrial waste contribute to the intensification of certain physical and technological processes. Active mineral additives, such as ground tripoli, opoka, marl, tuff, liparite, diatomite, volcanic ash, fuel ash, blast furnace slag, burnt clay, and others,

can interact with calcium hydroxide hydrates, improving specific properties of binders while simultaneously reducing their production costs [49-50].

Experimental data indicate that the use of thermal power plant ash (TPP) in concrete, when combined with modifying agents, can reach 200 kg/m<sup>3</sup>. At a content of 150–200 kg/m<sup>3</sup>, the utilization of TPP for concrete production alone could account for 22–30 million tons or 35–45% of its total production volume. Additionally, incorporating TPP into concrete reduces cement consumption by 5–15%, lowers the average concrete density, and enhances thermal protection properties of structures [51-53].

The most effective use of fly ash is achieved by substituting a portion of cement and sand while adhering to normalized component ratios. This approach maximizes cement savings and the total utilization of fly ash. This type of construction concrete requires less water during setting, exhibits reduced heat generation compared to pure Portland cement, and demonstrates lower shrinkage. Although the early strength of cement mixed with fly ash is lower, the difference diminishes with time and levels out in later stages [54-56].

Numerous studies have demonstrated that replacing up to 20% of sand with fly ash in the concrete mixture results in a 15–40% increase in compressive strength following heat-moisture treatment and a 12–15% increase at 28 days of age [57-58]. Fly ash serves as a micro-filler in the concrete mixture, improving its granulometric composition.

Cement solutions with 30% fly ash, ground to 10,500 cm<sup>2</sup>/g, exhibit compressive strength comparable to pure cement solutions at 28 days of age. Furthermore, cement solutions with 30% fly ash, ground to 6,450 and 10,500 cm<sup>2</sup>/g, exhibit significantly higher compressive strength than control samples over periods of 3 and 6 months. However, increased ash fineness requires significant energy consumption and higher material and labor costs [59-60].

The use of TPP allows for savings in cement, simplifies several production processes (such as concrete vibration and the use of expanded clay concrete mixtures), and substantially reduces production costs. Initially, ash was used as part of cement in

commercial mortars and concretes. Subsequently, unground ash was introduced to improve the overall granulometric composition of the mixture, compensating for unsatisfactory natural sand properties. Utilizing both ground and unground ash types reduces cement consumption by significant margins, with ground ash being more cost-effective in cement savings.

The demand for low-clinker binders in Ukraine arises from several factors: their low energy consumption and cost, the need for low-strength binders in low-rise housing construction (where high-strength cements are economically unfeasible), increased utilization of TPP, and addressing ecological issues in certain regions.

A resource-saving technology has been proposed for developing composite building materials containing phosphogypsum and fly ash. This involves mechanochemical activation of fly ash with acidic residues from chemical industry waste. Preliminary mixing of phosphogypsum with fly ash ensures additional chemical activation of ash. The acids in phosphogypsum destroy glassy films on fly ash particles and interact with its alkaline oxides. When phosphogypsum interacts with fly ash, it breaks aluminosilicate glassy shells, forming calcium hydrosilicates and aluminum sulfates. This destruction of glassy films enhances the hydraulic activity of these materials when active mineral additives are used [61-64].

The most effective neutralization of acid residues in phosphogypsum-fly ash compositions can be achieved by incorporating active mineral additives, such as marl. Marl binds free lime in the composition, preventing the formation of ettringite, while its carbonate content neutralizes acid residues. Marl contains both carbonate ( $\text{CaCO}_3$ ) and active silica ( $\text{SiO}_2$ ) [65-67].

Preliminary mixing and holding of phosphogypsum and fly ash at room temperature in a 60:40 ratio for various durations (0, 3, 6, 9, 12, 24 hours), with the addition of active mineral additives and cement, results in increased strength of composite binders. The strength of these materials is also dependent on the time taken to neutralize the acids in phosphogypsum [68-71].

A resource-saving technological scheme has been proposed for producing low-clinker binders using phosphogypsum (dihydrate), fly ash, cement, and natural

additives. This involves processing raw material mixtures in a three-section continuous mixer, ensuring the chemical and mechanical activation of fly ash and phosphogypsum. The technological scheme consists of the following stages: preparation of raw materials, preparation of the phosphogypsum-fly ash mixture to neutralize acids through intensive mixing, grinding of active mineral additives, and step-by-step mixing of the phosphogypsum-fly ash mixture with other components. Results of the tests are presented in Table 4.

Table 4

Characteristics of Building Material Test Samples

Composition of raw material mix, %				$\rho$ , kg/m <sup>3</sup>	Strength, MPa		W, %	Softening Coefficient K <sub>s</sub>
Phospho gypsum	Ash- uno	Portland cement	Marl		R <sub>comp</sub>	R <sub>bend</sub>		
50	30	20	—	1557	17,5	3,96	12,3	0,72
50	30	10	10	1642	19,8	4,78	9,39	0,84
25	43	11	21	1670	20,1	3,45	15,3	0,76
25	43	21	11	1697	29,7	2,95	11,8	0,85

The results of the physical and mechanical property studies of the samples, presented in Table 4, confirm that the increase in hydraulic activity and water resistance of the binder material, produced using phosphogypsum and fly ash, is achieved by the addition of active mineral additives, which promote the formation of calcium hydrosilicates. A rational method for neutralizing the acid residues from the phosphogypsum component with fly ash and marl as additives offers significant advantages compared to neutralizing phosphogypsum acid residues using lime or cement. The composition of raw material mixtures in the resource-saving technology, utilizing phosphogypsum, fly ash, marl, Portland cement, and fillers, meets the physical and mechanical requirements imposed on construction products. As shown in Table 4, the strength of the model samples ranges between 17.5 and 29.7 MPa.

## SECTION 2. AVIATION AND SPACE ROCKET TECHNOLOGY

DOI: 10.46299/ISG.2024.MONO.TECH.4.2.1

### 2.1 Тенденції світового двигунобудування

#### ВСТУП

У світі технічних досягнень і постійного прагнення інновацій, галузь двигунобудування відіграє найважливішу роль, визначаючи ефективність, стійкість та екологічну прийнятність транспортних засобів. Сьогодні, в еру інтенсивного розвитку технологій, людство зустрілось з низкою фундаментальних змін у світовому двигунобудуванні, які не лише переосмислюють традиційні уявлення про енергетику, а й ставлять перед галуззю нові виклики та перспективи.

Екологічні технології в сучасному авіаційному двигунобудуванні займають центральне місце, відповідаючи на виклики, пов'язані зі зміною клімату та необхідністю зменшення негативного впливу авіації на довкілля. Суттєві інновації та дослідження спрямовані на створення більш ефективних, чистих та енергоефективних двигунів, які можуть скоротити викиди забруднюючих речовин та зменшити залежність від нафти. Розглянемо кілька ключових екологічних технологій, що застосовуються в авіаційному двигунобудуванні [72].

#### ІННОВАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ У СІЧАСНИХ ТУРБОРЕАКТИВНИХ ДВИГУНАХ

Сучасні реактивні двигуни оснащуються передовими системами керування, які оптимізують суміш паливо-повітря та контролюють згоряння для зниження викидів. Застосування технологій, таких як високонаддувні двигуни, сприяє підвищенню тяги та ефективності, що знижує споживання палива та, отже, викиди.



Застосування високонаддувних двигунів представляє одну з найважливіших технологічних тенденцій в авіаційній індустрії, спрямованих на підвищення ефективності та продуктивності літакових двигунів. Ці двигуни також відомі як високонаддувні турбореактивні або турбовентиляторні двигуни, застосовують ряд інновацій для поліпшення характеристик авіаційних систем. Ключові аспекти та переваги застосування високонаддувних технологій в авіаційних двигунах [72]:

- Збільшення тяги та ефективності:

Високонаддувні двигуни спроектовані для досягнення більш високих ступенів стиснення повітряного потоку, що призводить до підвищеної тяги та покращеної ефективності. Цей процес знижує витрату палива та забезпечує кращу продуктивність на різних етапах польоту.

- Покращена термодинамічна ефективність:

За рахунок більш високих ступенів стиснення високонаддувних двигунів підвищується термодинамічна ефективність. Це важливо для зниження витрати пального та оптимізації роботи двигуна в різних умовах польоту.

- Зниження рівня шуму:

Високонаддувні турбовентилятори сприяють зниженню рівня шуму порівняно з старішими типами двигунів. Це особливо важливо у контексті дотримання суворих стандартів шумозахисту в аеропортах та містах.

- Поліпшена екологічна сумісність:

Використання високонаддувних технологій сприяє зниженню викидів шкідливих речовин, таких як оксиди азоту (NOx) та вуглеводні. Це відповідає сучасним екологічним стандартам та вимогам щодо сталого розвитку.

- Просунуті системи охолодження:

Високонаддувні двигуни зазвичай включають просунуті системи охолодження, які забезпечують ефективне зниження температур всередині двигуна. Це особливо важливо для запобігання пошкодженням від перегріву та забезпечення довговічності.

- Адаптація до різних фаз польоту:

Високоннаддувні двигуни добре адаптуються до різних фаз польоту, забезпечуючи стабільність та ефективність при зльоті, крейсерському польоті та посадці. Це підвищує універсальність цих двигунів до різних типів повітряних суден [73].

Застосування високоннаддувних технологій авіаційних двигунах продовжує залишатися ключовим напрямом інновацій, вкладених у вдосконалення авіаційної індустрії. Ці технології відіграють важливу роль у сучасному двигунобудуванні, підтримуючи вимоги до ефективності, екологічної стійкості та безпеки польотів.

Впровадження композитних матеріалів у конструкцію двигунів знижує їхню вагу, що у свою чергу скорочує споживання палива та викиди. Міцні та легкі матеріали, такі як карбонові композити, допомагають створювати більш ефективні та екологічно чисті двигуни [74].

Карбонові композити: Легкі, міцні та стійкі до корозії, карбонові композити знайшли широке застосування в авіаційних двигунах. Вони використовуються для створення лопат вентиляторів, корпусів та інших ключових деталей, знижуючи вагу та покращуючи ефективність.

TiAl (титан-алюміній): Цей матеріал має високу міцність і низьку щільність. Він використовується для створення турбінних лопаток, що допомагає знизити вагу двигуна та підвищити його ефективність.

Інконель: Інконель широко використовується для створення деталей, що працюють в умовах високих температур та агресивних середовищ. Він забезпечує високу термостійкість та стійкість до корозії.

Керамічні композити: Керамічні матеріали мають видатні властивості, такі як висока термостійкість і механічна міцність. Вони використовуються для створення турбінних лопаток та інших високотемпературних компонентів.

MAR-M (Марганцеві сталі): Сплави цього типу використовуються в критичних компонентах, таких як турбіни. Вони забезпечують високу міцність та стійкість до впливу високих температур та агресивних середовищ.

Керамічні покриття: Нанесення керамічних покриттів на поверхню деталей дозволяє покращити теплоізоляцію та захистити матеріал від окиснення та корозії.

Керамічні волокна: Застосування керамічних волокон в ізоляційних матеріалах допомагає знизити теплові втрати та покращити ефективність двигуна.

Ці інновації в матеріалознавстві не тільки збільшують продуктивність та ефективність двигунів, але також забезпечують більш тривалий термін служби та знижують екологічний слід авіації, що є важливим кроком у напрямку сталого розвитку в авіаційній індустрії.

Електричні двигуни в авіації [75]:

- Низькі викиди та шум:

Електричні двигуни забезпечують низькі рівні викидів та шуму, що робить їх більш екологічно та соціально стійкими.

- Ефективність та економія:

Електричні двигуни, особливо в комбінації із сучасними технологіями батарей, можуть забезпечити високу ефективність та зниження операційних витрат.

- Поліпшена технологічна гнучкість:

Електричні двигуни забезпечують нові концепції літальних апаратів, таких як електричні вертикальні злети (eVTOL) та безпілотні літальні апарати.

- Найменша вага та покращена аеродинаміка:

Електричні двигуни зазвичай легші і компактніші, що може призвести до поліпшення аеродинамічних характеристик і загальної продуктивності.

- Розвиток інфраструктури:

Впровадження електричних двигунів сприяє розвитку інфраструктури для заряджання та обслуговування електричних літальних апаратів.

Об'єднання цих технологій може стати ключовим фактором у створенні більш стійкої авіації, скорочуючи її вплив на довкілля та сприяючи економічному розвитку нових галузей.

Сучасні двигуни обладнані системами рециркуляції газів та фільтрації, які дозволяють переробляти та зменшувати викиди. Це включає технології, такі як системи очищення NOx і поліпшені методи спалювання палива. У тому числі авіаційні двигуни, широко оснащені системами рециркуляції газів (EGR) та фільтрації, що допомагає зробити їх більш ефективними, екологічно чистими та відповідними суворим нормативам викидів [76]:

Системи рециркуляції газів (EGR) дозволяє:

- Знизити температуру згоряння:

EGR дозволяє повертати частину відпрацьованих газів назад у циліндри двигуна. Це знижує температуру згоряння, що допомагає скоротити утворення оксидів азоту (NOx) - речовин, які роблять внесок у забруднення повітря.

- Обмеження утворення оксидів азоту NOx:

Завданням EGR є зменшення концентрації кисню у суміші повітря та палива, що знижує ймовірність утворення NOx при високих температурах згоряння.

- Екологічна стійкість:

Використання EGR допомагає двигунам відповідати суворим нормативам щодо викидів шкідливих речовин, що суттєво покращує екологічну стійкість автотранспорту.

- Зниження викидів шкідливих речовин:

Фільтри допомагають знижувати викиди токсичних частинок, таких як вуглець, який може мати негативний вплив на здоров'я людини та довкілля.

Дотримання стандартів:

Застосування систем фільтрації є обов'язковим відповідно до суворих нормативів з екології та стандартів на рівні країн та регіонів.

Ці технології є важливими компонентами стратегії авіаційної індустрії у скороченні шкідливих впливів на довкілля. Їх впровадження та постійне вдосконалення сприяють створенню більш чистих та ефективних двигунів.

Ефективні системи охолодження зменшують температуру згоряння та підвищують ефективність двигунів. Це дозволяє знижувати викиди оксидів азоту та інших шкідливих речовин.

Ефективні системи охолодження відіграють важливу роль у зниженні температури згоряння всередині двигунів, що, своєю чергою, може підвищити їх ефективність та довговічність. Принцип роботи систем охолодження [76]:

- Охолодження гарячих компонентів:

Системи охолодження спрямовані на керування температурою найгарячіших компонентів двигуна, таких як турбіни та циліндри. Це особливо важливо в авіаційних та аерокосмічних двигунах, де робота при високих температурах є звичайною.

- Уникнення перегріву:

Охолодження допомагає уникнути перегріву рухових компонентів, що може призвести до пошкоджень матеріалів та зниження продуктивності.

- Поліпшення термічної ефективності:

Підтримка оптимальної температури згоряння сприяє більш ефективному процесу згоряння палива, що, своєю чергою, може покращити термічну ефективність двигуна.

Переваги ефективних систем охолодження:

- Підвищення ефективності:

Управління температурою дозволяє оптимізувати роботу двигуна, що призводить до підвищення його ефективності та зниження витрати палива.

- Збільшення довговічності:

Системи охолодження сприяють збільшенню довговічності двигунів, запобігаючи пошкодженню та зносу від високих температур.

- Відповідність екологічним стандартам:

Ефективні системи охолодження можуть допомогти дотримуватися суворих екологічних стандартів, оскільки вони можуть сприяти зниженню викидів шкідливих речовин.

- Підтримка оптимальних умов роботи:

Охолодження дозволяє підтримувати оптимальні умови для інших важливих систем, таких як мастило, що також сприяє загальній ефективності двигуна.

- Поліпшення теплового балансу:

Системи охолодження допомагають керувати тепловим балансом двигуна, що важливо для запобігання перегріву та пошкодженню компонентів.

Ефективні системи охолодження є важливим елементом сучасних двигунів, особливо у високотехнологічних авіаційних та аерокосмічних додатках, де вимоги до продуктивності та надійності дуже високі.

Отже, екологічні технології у сучасному авіаційному двигунобудуванні відкривають нові горизонти у створенні стійкої та відповідальної авіації. Інженери та вчені продовжують працювати над новими методами та рішеннями, щоб зробити авіацію більш екологічно чистою та ефективною, вписуючись у глобальні зусилля щодо боротьби зі зміною клімату та скорочення впливу транспорту на навколишнє середовище.

## **ОСНОВНІ НАПРЯМКИ ВДОСКОНАЛЕННЯ ТРД**

Високі вимоги до технічних даних сучасних літаків визначили перетворення їх у складні авіаційні комплекси при одночасному суттєвому зростанні вартості їх створення та експлуатації.

Оптимізація технічних рішень і зменшення витрат при створенні перспективних літаків вимагає вже на початкових етапах їх проектування ретельної оцінки взаємозв'язку характеристик основних складових елементів авіаційного комплексу.

Вибір двигуна для літака з безлічі можливих варіантів ускладнюється необхідністю обліку параметрів та характеристик усієї силової установки загалом.

Газотурбінні двигуни (ГТД) є основним типом двигунів, які застосовуються у військовій та цивільній авіації. Це зумовлено тим, що тягово-

економічні характеристики цих двигунів добре узгоджуються з аеродинамічними характеристиками літальних апаратів. Остання обставина забезпечує необхідну тягоозброєність літального апарату при прийнятних значеннях економічності авіаційної силової установки [77].

Однією з найскладніших завдань під час створення авіаційного двигуна є вибір параметрів робочого процесу двигуна та розрахунок його експлуатаційних характеристик. Цей етап передує проектування та виготовлення дослідного зразка. Він ґрунтується на вимогах до літального апарату та його силової установки, оцінки технологічних можливостей створення всіх елементів літального апарату та його двигунів, розробці концепції застосування та експлуатації літального апарату.

Вимоги до літального апарату та його силової установки обґрунтовуються з урахуванням його призначення, умов застосування, заданих експлуатаційних та транспортних характеристик. При остаточному обґрунтуванні концепції літального апарату та його силової установки здійснюється ретельний аналіз варіантів проекту. Крім параметрів літака, які характеризуються його аеродинамікою (навантаженням на крило, подовженням крила, аеро-динамічної компоновкою літака та ін.), оптимізуються параметри робочого процесу двигуна (температура газу перед тур-біною, ступінь підвищення тиску в компресорі на розрахунковому режимі, ступінь двоконтурності, температура газу в форсажній камері) та ряд інших параметрів, що визначають ефективність та економічність газотурбінного двигуна.

Створення двигунів нових схем обумовлено перспективами розвитку літальних апаратів. Воно передбачає вирішення таких завдань [77]:

- покращення характеристик двигунів за рахунок використання термодинамічних циклів з високими параметрами;
- використання змінюваних термодинамічних циклів в залежності від умов польоту;
- використання двигунів безпосередньо для створення підйомної сили крила.

- Вартість палива є значною частиною прямих експлуатаційних витрат під час експлуатації літаків.

Тому сучасні розробки спрямовані створення літаків з високоекономічними двигунами.

У розробках ряду фірм важливе місце займають дослідження з удосконалення параметрів та характеристик гвинтовентиляторів. Відомо, що зменшення витрати палива за рахунок встановлення на літаку двоконтурних двигунів можливе лише у разі, якщо підвищення ступеня двоконтурності не супроводжується значним зростанням маси та зовнішнього опору силової установки.

ТВВС з гвинтовентилятором за загального ступеня підвищення тиску в компресорі 25 та температурі газу перед турбіною на крейсерському режимі 1600 К має значні переваги порівняно з ТРДД при дозвукових швидкостях польоту, відповідних  $M=0,7...0,8$ . При вищих значеннях  $M$  ці переваги зменшуються.

Перспективними напрямками у розвитку двигунів є:

1. схема open rotor або propfan engine (рис 1.1).



Рис. 1.1 – двигун Д-70 (створений за схемою open rotor) літака АН-70



Відкритий роторний двигун (Open Rotor Engine) є типом турбореактивного двигуна, який має два контроптри (пропелери), розташовані без обшивки або з мінімальною обшивкою. Це відрізняється від традиційних турбореактивних двигунів, таких як турбовентилятори, де контроптри покриті кожухом.

Можливі переваги Open Rotor Engine включають більший ККД завдяки більшому конкретному тяговому зусиллю і меншому споживанню палива порівняно з турбовентиляторами. Такі двигуни можуть забезпечити значні економічні та екологічні переваги завдяки своїй ефективності.

Недоліками Open Rotor Engine є більш високий рівень шуму і вібрації, що може потребувати додаткових заходів з управління шумом і вібрацією. Також потрібні зміни в аеродинамічному проектуванні крила для оптимальної інтеграції таких двигунів [78].

CFM International запустила RISE engine – нову демонстраційну програму двигуна з відкритою роторною архітектурою (рис. 1.2), яка обіцяє забезпечити 20% підвищення ефективності палива порівняно з сучасними вузькофюзеляжними силовими установками.

Льотні випробування в рамках програми RISE — або революційної інновації для стійких двигунів — заплановані на середину десятиліття, щоб відпрацювати технології, необхідні для введення нової силової установки в експлуатацію в 2030-х роках.



Рис. 1.2 – концепт двигуна RISE з відкритою роторною архітектурою [78]

Цілі програми включають зменшення споживання палива та викидів вуглекислого газу більш ніж на 20% порівняно з поточним двигуном CFM Leap, який сам забезпечив 15% покращення спалювання палива порівняно з попереднім CFM56 (рис. 1.3).



Рис. 1.3 – двигун CFM56

RISE базується на десятиліттях досліджень конструкцій відкритого гвинта в GE Aviation і Safran (спільних власниках CFM), включаючи GE36 (рис. 1.4)

середини 1980-х років, який з'явився на авіасалоні у Фарнборо в 1988 році на борту McDonnell Douglas MD-80.



Рис. 1.4 – двигун GE36

Однак удосконалення технології матеріалів і цифрового моделювання дозволили партнерам усунути значні розміри, вагу та рівень шуму, притаманні цим попереднім конструкціям.

Архітектура відкритого ротора забезпечує «величезну тягову ефективність», але здатна «літати зі швидкістю сучасних турбовентиляторів».

Діаметр вентилятора було значно зменшено до 144-156 дюймів (365-396 см) – відповідно до зовнішнього діаметра вузькофюзеляжного двигуна поточного покоління – що дозволяє встановити його на вузькофюзеляжний літак.

Крім того, вирішино «спростити» загальну архітектуру порівняно з попередніми двигунами з відкритим ротором [78].

RISE має один обертовий вентилятор із змінним кроком лопатей із вуглецевого волокна, за якими розташований ряд статичних направляючих лопаток. Попередній демонстратор Safran Sage 2 мав другий ступінь вентилятора, що обертався протилежно, але для цього були потрібні складні внутрішні конструкції, які були дуже важкими.

Турбомашина системи міститься в прискорювачі, що складається з високотемпературного високошвидкісного сердечника та високошвидкісної турбіни низького тиску.

Температури та коефіцієнти тиску в ядрі перевищуватимуть ті, що спостерігаються в поточних двигунах CFM Leap [78].

Ступенева зміна продуктивності стане можливою завдяки використанню передових матеріалів. Це включає композити з керамічною матрицею, які вже використовуються в кожухах двигунів сімейства Leap, а також використання 3D-друку для виготовлення нових структур – наприклад, лопаток статора з внутрішніми каналами для кращого охолодження [78].

Важливо те, що двигун RISE не залежатиме від джерела палива – зможе працювати на 100% екологічному авіаційному паливі або водні – забезпечуючи гнучкість для майбутніх застосувань.

Покращення спалювання палива на 20% може мати вирішальне значення для протидії ймовірній більшій вазі баків для водневого палива, що дозволить авіакомпаніям підтримувати поточні маршрути.

Кілька електрогенераторів також будуть встановлені на двигуні, здатні витягувати або забезпечувати енергію за потреби. Конструкція дозволе передавати потужність від однієї котушки до іншої залежно від фази польоту для оптимізації котушок.

GE намагається вирішити деякі проблеми, починаючи з випробувань відкритих роторів у 1980-х роках. Як наслідок, архітектура дозріла з десятиліть тому. Ці випробування наприкінці 1980-х років довели ефективність концепції відкритого ротора, але показали, що шум залишається серйозною проблемою, яку необхідно вирішити. Проте триваючі дослідження та передові інженерні інструменти, удосконалені протягом десятиліть тестування двигунів з відкритою роторною архітектурою, а також новітні комп'ютерні інструменти проектування дозволили оптимізувати форму крила для як продуктивності, так і акустики. Це дозволить RISE відповідати майбутнім акустичним нормам [79].

Демонстраційний двигун RISE матиме розмір тяги 30 000 фунтів (133 кН). З відкритою конструкцією ротора можна досягти крейсерської швидкості, яка дорівнює поточному рівню і навіть трохи більше.

Хоча CFM спочатку націлений на сегмент коротких і середніх дальностей, дизайн може бути адаптований до потреб клієнтів, навіть потенційно масштабований для широкофюзеляжних застосувань.

GE і Safran продовжили своє партнерство в CFM на десятиліття, причому угода, яка розпочалася в 1974 році, тепер діє до 2050 року.

Але найближчим часом попит, ймовірно, буде на новий вузькофюзеляжний двигун; Потенційний клієнт Airbus зазначив, що можливий наступник A320neo може вийти в 2030-х роках.

Але новий літак доведеться проектувати на основі нових силових установок (рис. 1.5). Для досягнення тягової ефективності немає сенсу встановлювати двигун нового покоління на вчорашній планер і сподіватися на хороші характеристики [79].



Рис. 1.5 – концепт літака з двигуном RISE

## 2. Коцепція розподілення силових установок на літаку (рис. 1.6)

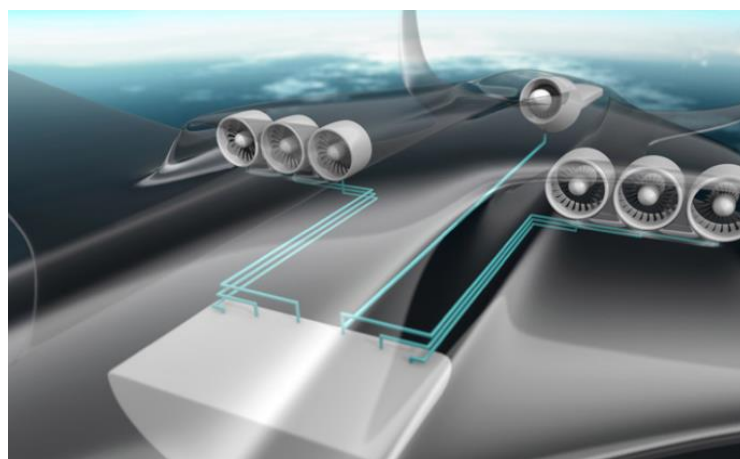


Рис. 1.6 – приклад схеми розподілення силових установок на літаку

Розподілена силова установка на літаку (Distributed Propulsion System) - це концепція, в якій тягові двигуни розміщені на кількох точках або поверхнях літака, замість традиційного центрального розташування. Ця концепція може включати в себе використання різних видів двигунів, таких як електричні пропелери, турбореактивні або турбовентиляторні двигуни, розташованих на крилах, хвості, фюзеляжі або навіть на кришці кабіни [80].

Переваги розподіленої силової установки включають покращену аеродинаміку, збільшену ефективність, зниження вібрації та шуму, а також більшу надійність через можливість резервування потужності між різними двигунами. Крім того, така система може забезпечувати певну ступінь резервування в разі відмови одного з двигунів.

Проте розподілена силова установка також може мати виклики, пов'язані з складнішим управлінням системами, вагою та складністю проектування, а також з питаннями щодо безпеки і технічної надійності. Також вона вимагає нових методів регулювання та управління для оптимального використання розподіленої тяги [80].

### 3. схема літака з електричним двигуном з вентилятором

Електричний двигун з вентилятором представляє собою систему, де електричний двигун використовується для приведення в рух вентилятора, який генерує тягу для приводу повітряного транспорту, такого як літаки або дрони [81].

- Електричні двигуни мають високий КПД, в порівнянні з традиційними авіаційними двигунами з внутрішнього згорання. Вони можуть бути більш ефективними використовувати енергію і забезпечувати більшу тягу на одиницю витрат палива.

- Електричні двигуни не викидають в атмосферу відходи, що створюють парниковий ефект, такі як вуглекислий газ та оксиди азоту, як це роблять двигуни з внутрішнім згоранням.



- Електричні двигуни зазвичай мають менший рівень шуму порівняно з традиційними авіаційними двигунами, що може бути важливим для підвищення комфорту пасажирів та зменшення впливу на довкілля.

- Електричні двигуни зазвичай мають обмежену потужність або енергетичну щільність батарей, що може обмежувати дальність польоту або завдавати викликів щодо тривалості польоту.

- Перезарядка батарей може займати значний час порівняно з заправкою традиційного літака паливом, що обмежує ритмічність польотів та збільшує час очікування для пасажирів і екіпажу.

- Батареї є важкими, що може впливати на загальну масу літака та його здатність до носіння вантажу та пасажирів.

- Вартість батарейних технологій залишається високою, що робить електричні літаки дорожчими в експлуатації та придбанні порівняно з традиційними літаками з паливними двигунами.

Airbus E-Fan - це приклад електричного літака (рис.1.7), розроблений компанією Airbus Group [82].



Рис. 1.7 - Airbus E-Fan

#### 4. Літаки з гібридними двигунами

Гібридні двигуни літаків поєднують у собі два або більше джерела енергії, зазвичай внутрішнього згоряння та електричну енергію, для приведення в рух літака. Гібридні системи можуть бути більш ефективними, оскільки комбінують переваги двох різних джерел енергії. Внутрішнє згоряння може бути використане для довгих перельотів, а електричні двигуни - для коротких польотів або для

енергозбереження під час злету та посадки. Використання електричних двигунів у гібридних системах може зменшити викиди шкідливих речовин, таких як вуглекислий газ та оксиди азоту, сприяючи зменшенню впливу на довкілля. Електричні двигуни зазвичай мають менший рівень шуму порівняно з традиційними авіаційними двигунами, що може покращити комфорт для пасажирів та зменшити вплив на довкілля. Гібридні системи дозволяють літакам користуватися різними джерелами енергії, що може зробити їх більш гнучкими та менш залежними від конкретного виду палива [83].

Однак гібридні двигуни літаків також можуть мати свої виклики, такі як складність системи, вага та обмеженість технологій, що можуть впливати на ефективність та вартість. Також потрібна інфраструктура для підтримки гібридних систем на аеропортах та в інших місцях.

Один з прикладів гібридного літака - "Airbus E-Fan X" (рис. 1.8). Це проект спільної розробки Airbus, Rolls-Royce та Siemens, спрямований на створення гібридного електричного приводу для літаків [84].



Рис. 1.8 - Airbus E-Fan X [80]

Один з недоліків гібридних літаків полягає в складності системи та її впровадженні. Так як гібридні літаки потребують інтеграції двох або більше різних джерел енергії та систем приводу. Це може призвести до складності управління, підтримки та обслуговування. Додавання компонентів для гібридної системи може збільшити загальну масу та об'єм літака, що може вплинути на його продуктивність, дальність польоту та корисне навантаження. Додавання нових компонентів і систем до літака може збільшити ризик відмов та



несправностей. Це вимагає додаткових заходів з управління ризиком та забезпечення надійності.

Найсучаснішими двигунами є:

#### 1. High Bypass Ratio (HBR) engine

Двигуни з високим ступенем двоконтурності (High Bypass Ratio Engines) є основними у сучасних пасажирських літаках. Високе співвідношення обтічної дільниці дозволяє досягти великої тяги при низьких швидкостях, що важливо для злітно-посадкових операцій та польотів на невеликій висоті. Ці двигуни зазвичай відзначаються високою пальнозбереженістю, що робить їх привабливими для авіакомпаній, оскільки вони дозволяють знизити витрати на паливо. Вони менш шумні і зазвичай мають менші викиди шкідливих речовин порівняно з двигунами з низьким співвідношенням обтічної дільниці. Але високе співвідношення обтічної дільниці часто призводить до більших розмірів та маси двигуна, що може вплинути на загальну масу та розміри літака. Но з іншої сторони вони можуть мати відмінну ефективність у різних режимах польоту, що потребує аналізу з точки зору оптимізації польотних процесів [85].

Один з прикладів двигуна з високим співвідношенням обтічної дільниці - це Pratt & Whitney PW1000G (рис. 1.9), також відомий як PurePower PW1000G. Цей двигун використовує передові технології, такі як зменшення внутрішнього опору і високоефективні компресори, що дозволяють досягти високого співвідношення обтічної дільниці. PW1000G встановлюється на літаках серії Airbus A320neo, Bombardier CSeries (тепер Airbus A220), Embraer E-Jets E2 та інших. Він відзначається низьким рівнем шуму, паливозбереженістю та відмінними тяговими характеристиками.



Рис. 1.9 - Pratt & Whitney PW1000G

## 2. Geared Turbofan engine

Geared Turbofan Engine (GTF) - це нова генерація авіаційних двигунів, які використовують редуктор для зменшення обертової швидкості вентилятора. Зубчаста передача дозволяє оптимізувати швидкість вентилятора, зменшуючи внутрішні втрати та підвищуючи ефективність. Зменшення обертової швидкості вентилятора дозволяє знизити споживання палива, що робить GTF економічнішими порівняно з традиційними турбовентиляторними двигунами. Зменшення обертової швидкості вентилятора також може сприяти зниженню шуму, що робить GTF більш прийнятним для пасажирів і мешканців місць, через які пролягають маршрути польотів. Використання зубчастої передачі дозволяє покращити розподіл тяги та оптимізувати роботу вентилятора, що покращує загальні характеристики двигуна [86].

На літаках Boeing використовується двигун Pratt & Whitney GTF (Geared Turbofan), зокрема модель PW1900G (рис. 1.10). Цей двигун встановлюється на літаки Boeing 737 MAX. Geared Turbofan Engine допомагає забезпечити

покращену ефективність, низький рівень шуму і зниження викидів, що робить його привабливим для використання в сучасних авіалайнерах.



Рис. 1.10 - Pratt & Whitney PW1900G

### 3. Three Spool Turbofan engine

Тривальовий турбовентиляторний двигун (Three Spool Turbofan Engine) є одним з видів турбореактивних двигунів, що використовуються у сучасній авіації. Тривальові турбовентиляторні двигуни зазвичай мають вищий рівень ефективності порівняно з двигунами з меншою кількістю валів. Це досягається завдяки більш точному регулюванню кожного вала та оптимізації внутрішнього обертання. Завдяки розділенню потоків повітря на три ступені обертання, тривальові двигуни можуть досягти оптимального балансу між витратою палива та отриманням потрібної тяги. Розділення двигуна на три ступені дозволяє зменшити внутрішні викиди та механічний знос, що може підвищити надійність роботи [87].

Ці двигуни часто використовуються на великих пасажирських літаках та в громадському та військовому авіаційному транспорті. Один з прикладів тривальового турбовентиляторного двигуна - це Rolls-Royce Trent 800 (рис 1.11).

Цей двигун використовується на таких літаках, як Boeing 777. Rolls-Royce Trent 800 має тривалу архітектуру, що означає, що він складається з трьох незалежних валів: низького тиску, середнього тиску та високого тиску.

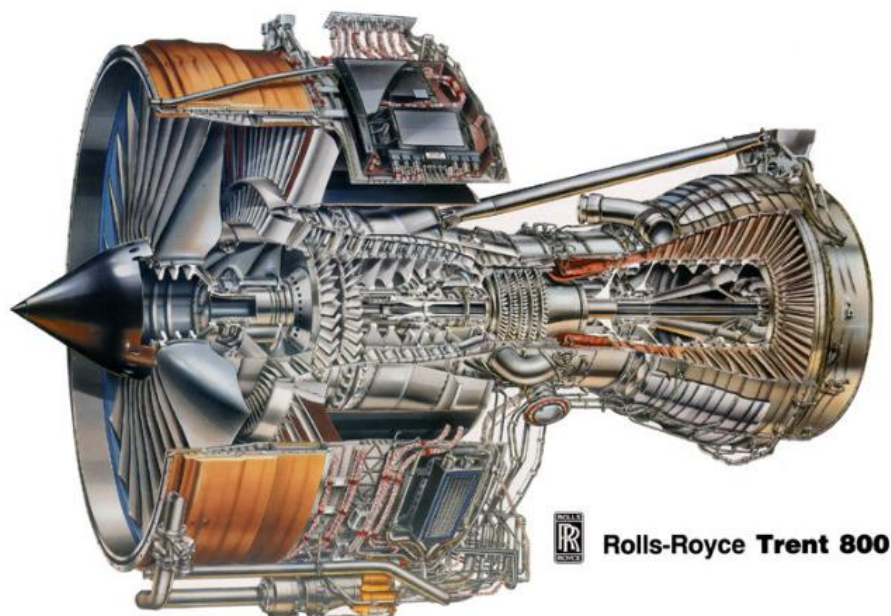


Рис. 1.11 - Rolls-Royce Trent 800

#### 4. Intercooled Turbofan (ITF)

Турбовентиляторний двигун з проміжним охолодженням (Intercooled Turbofan Engine) є одним зі способів підвищення ефективності і тяги двигуна шляхом використання проміжного охолодження повітря між компресорними ступенями. Проміжне охолодження дозволяє знизити температуру повітря між компресорними ступенями, що дозволяє підвищити ступінь стиснення та підвищити ефективність циклу. Охолоджене повітря менше нагрівається під час стиснення, що допомагає зменшити внутрішні втрати та підвищує ефективність стиснення. Зниження температури повітря дозволяє використовувати більше палива і підвищує тягу, що поліпшує характеристики двигуна [88].

Проміжне охолодження вимагає додаткового обладнання та технічної складності, що може підвищити вартість та складність обслуговування. Турбовентиляторні двигуни з проміжним охолодженням не є загально поширеними в авіаційній індустрії, оскільки це досить складна технологія.



Один з прикладів концептуального розроблення - це проект університету Массачусетського технологічного інституту (MIT) та компанії Pratt & Whitney, що включає в себе концепцію турбореактивного двигуна, який використовує проміжне охолодження повітря. Цей проект мав на меті зменшити витрати палива та знизити викиди вуглекислого газу [89].

#### Bleedless Engine (BE)

Двигун без системи відбору повітря (Bleedless Engine) – один із видів сучасних двигунів, наприклад використовується на літаках Airbus A350 - Rolls-Royce Trent XWB (рис. 1.12)

Відсутність системи відбору повітря дозволяє підвищити ефективність двигуна та знизити споживання пального. Це досягається за рахунок оптимізації процесів стискання повітря та ефективного використання його для генерації тяги. Також спрощує конструкцію двигуна та дозволяє знизити його масу, що важливо для підвищення тяги-масового відношення та зниження витрат палива. Зменшення споживання палива та підвищена ефективність можуть призвести до зниження викидів шкідливих речовин, що сприяє покращенню екологічних характеристик двигуна [90]



Рис. 1.12 - Rolls-Royce Trent XWB

Підвищення економічності авіаційних силових установок можливе не тільки за рахунок застосування нових конструкційних схем, а також і за рахунок використання двигунів зі зміною параметрів термодинамічних циклів, застосування регенеративних теплообмінників, силових установок, що забезпечують управління обтіканням поверхні крила та систем ламінаризації обтікання літака.

Оцінки економічної ефективності за прямими експлуатаційними витратами (ПЕВ) використання на літаку ТРДР регенерації теплової енергії показали наступне. При дальності польоту до 3000 км для літака, у якому встановлений ТРДД з регенератором, ПЕВ на 2 % вище, ніж літака зі звичайним ТРДД без регенератора. Тільки за дальності польоту 9000 км ПЕВ для літака з ТРДД з регенератором будуть на 2% нижчі.

Одним з варіантів підвищення ефективності силових установок з ГТД є використання двигунів, розташованих у хвостовій частині фюзеляжу, енергії прикордонного шару, який формується на поверхні фюзеляжу перед вхідним перерізом двигунів. Прикордонний шар «зливається» з поверхні фюзеляжу через кільцеву щілину і додається до витрати повітря, що поступає в двигуни [91].

Оцінити позитивний ефект відсмоктування (зливу) прикордонного шару можна на основі порівняння сили тяги звичайного двигуна із силою тяги ГТД, в якому використовується енергія прикордонного шару. При повному розширенні в реактивному соплі ретельного ГТД сила тяги визначається за виразом  $R=G(c-V)$ .

Сила тяги силової установки з ГТД, в якій використовується енергія прикордонного шару, визначається за виразом [92]

$$R=G[c(1+g_{nc})-V,$$

де  $g_{nc}$  - відношення витрати повітря прикордонного шару до витрати повітря через

Без урахування втрат управління прикордонним шаром підвищення тяги становить 1.3 % залежно від розмірів літака і параметрів ГТД . Крім підвищення

тяги за рахунок збільшення витрати повітря через двигун може бути зменшено загальний опір літака на 15 ... 20%.

Двигун із змінними параметрами робочого процесу циклу може забезпечити поліпшення характеристик ГТД у широкому діапазоні режимів висот та швидкостей польоту. Зміна параметрів термодинамічного циклу ТРДД забезпечується пристроєм для перерозподілу потоків повітря між внутрішнім і зовнішнім контурами.

Існують дві концепції ТРДД із зміною параметрів робочого процесу циклу. Перша ґрунтується на застосуванні клапанів або засобів, які змінюють напрямок течії повітря у контурах двигуна. Друга концепція передбачає регулювання прохідних перерізів двигуна та частот обертання роторів.

На початковому етапі досліджень рядом фірм розглядалися схеми ТРДДФ і ТРДД з регулюванням прохідних перерізів і секціями для створення перехресної або паралельної течії повітряних потоків. Якщо потоки мають паралельне рух, реалізується цикл одноконтурного ТРД з високим ступенем підвищення тиску. Цикл ТРДД реалізується при перехресному перебігу повітря. Сумарний витрата повітря в цьому випадку збільшується вдвічі.

Засоби перемикавання мають дуже велику масу і характеризуються великими втратами енергії. Установка додаткового каналу повітрязабірника для збільшення витрати повітря при роботі двигуна за циклом ТРДД значно ускладнює конструкцію і призводить до зростання аеродинамічного опору мотогондоли. У свою чергу, при закритті каналу зовнішнього контуру в надзвуковому польоті виникає додатковий донський опір.

Можна відзначити основні напрямки вдосконалення авіаційних силових установок із газотурбінними двигунами [21]:

- вдосконалення параметрів робочого процесу ГТД;
- вдосконалення параметрів та характеристик елементів газотурбінних двигунів шляхом використання перспективних методів розрахунку перебігу;

- вдосконалення камер згоряння ГТД за рахунок підвищення повноти згоряння палива в широкому діапазоні режимів роботи (застосування каталітичних, двозонних, вихрових камер згоряння);
- застосування ГТД з регенерацією тепла та ГТД із змінними параметрами циклу;
- застосування вентиляторів з поворотними лопатями, газових турбін з поворотними сопловими апаратами;
- інтеграція параметрів та характеристик літального апарату та двигуна.

## ТРИКОНТУРНИЙ ГАЗОТУРБІННИЙ ДВИГУН

Один з основних недоліків одноконтурних газотурбінних двигунів - їх відносно низька економічність, обумовлена високим рівнем теплових втрат внаслідок високих значень температури газу на виході з двигуна. Кращої паливної економічності, ніж ТРД мають двоконтурні турбореактивні двигуни - ТРДД і турбогвинтові двигуни [93].

ТРДД з великим ступенем двоконтурності є основним типом газотурбінних двигунів, які встановлюються на сучасних дозвукових пасажирських і транспортних літаках.

Відомі конструкції двоконтурних двигунів із заднім розташуванням турбовентиляторної приставки, які створені на основі базових одноконтурних газогенераторів ТРД. Прикладами ТРДД заднім розташуванням вентилятора можуть бути двигуни GP-700, CJ.805-23 (рис. 1.13).

Застосування турбовентиляторної приставки дозволяє вирішити дві основні завдання, що стоять під час створення газотурбінних двигунів.

По-перше, з найменшими економічними витратами реалізувати на практиці принцип модульності при створенні сімейства газотурбінних двигунів на основі одного базового газогенератора. Наприклад, фірмою Дженерал-Електрик на базі газогенератора серійного турбореактивного двигуна J-79 був



створений ТРДД з турбовентиляторною приставкою CJ805-21, а на базі одноконтурного двигуна J-85 двоконтурний двигун CF-700-1, що має тягу в стартових умовах на 3 -40% більшу, ніж вихідні двигуни. Ступінь збільшення тяги порівняно з тягою вихідного двигуна зменшується зі зростанням швидкості польоту. На крейсерському режимі польоту з дозвуковою швидкістю збільшення тяги становить до 15%.

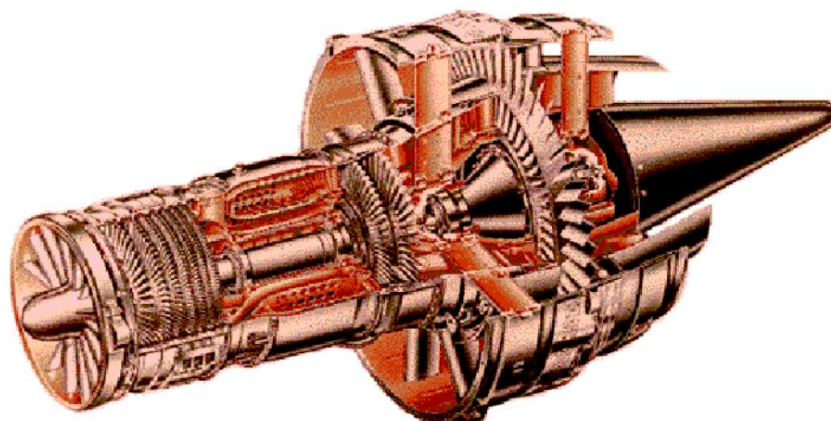


Рис. 1.13 – Двигун з турбовентиляторною приставкою CJ.805-23

По-друге, суттєво підвищити економічність авіаційної силової установки з ГТД на дозвукових швидкостях польоту. Поліпшення економічності пояснюється збільшенням тяги двигуна за практично незмінною витраті палива в контурі газогенератора.

Схема ТРДД із заднім розташуванням турбовентиляторної приставки на базі модуля газогенератора ТРД J-85 представлена на рис. 1.14 [93]

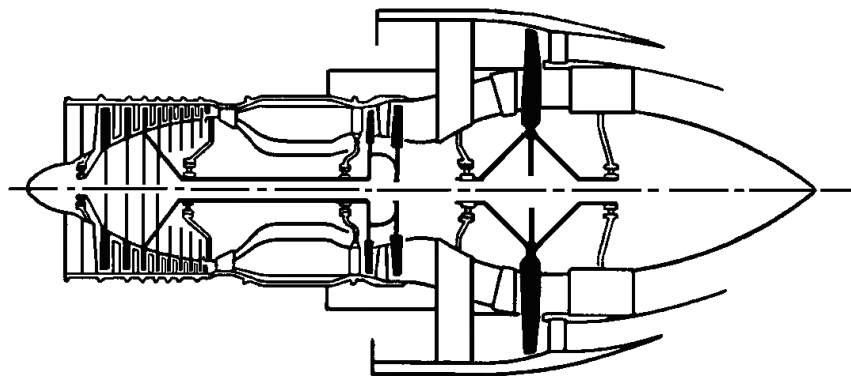


Рис. 1.14 – Схема ТРДД на базі модуля газогенератора ТРД J-85 [93]

З точки зору аеродинамічної інтеграції силової установки та літального апарату ТРДД із заднім розташуванням турбовентиляторної приставки (штовхаючий турбовентилятор) дозволяє найбільш повно реалізувати аеродинамічні характеристики крила і покращити акустичні характеристики силової установки. Інтенсивність шуму у стартових умовах знижується в середньому на 8-10 дБ [93].

Основний недолік конструктивно-компонувальної схеми

ТРДД із заднім розташуванням полягає у суттєвій температурній нерівномірності потоку в каналі турбовентиляторної приставки: внутрішня - турбінна частина робочого колеса обтікається гарячим газом за турбіною з температурою  $T_T^* = 800 - 900\text{K}$ ; зовнішня частина приставки, яка працює як вентилятор другого контуру, обтікається повітряним потоком з параметрами атмосферного повітря. Це призводить до високого рівня температурної напруги в робочих лопатках колеса.

На рис. 1.15 зображена схема двовального триконтурного двигуна зі змішуванням потоків першого та другого контурів у камері змішування, розташованій між турбіною газогенератора і турбіною турбовентиляторної приставки. Газовий потік, що виходить із турбіни низького тиску газогенератора, є робочим тілом для турбіни турбовентиляторної приставки [93].

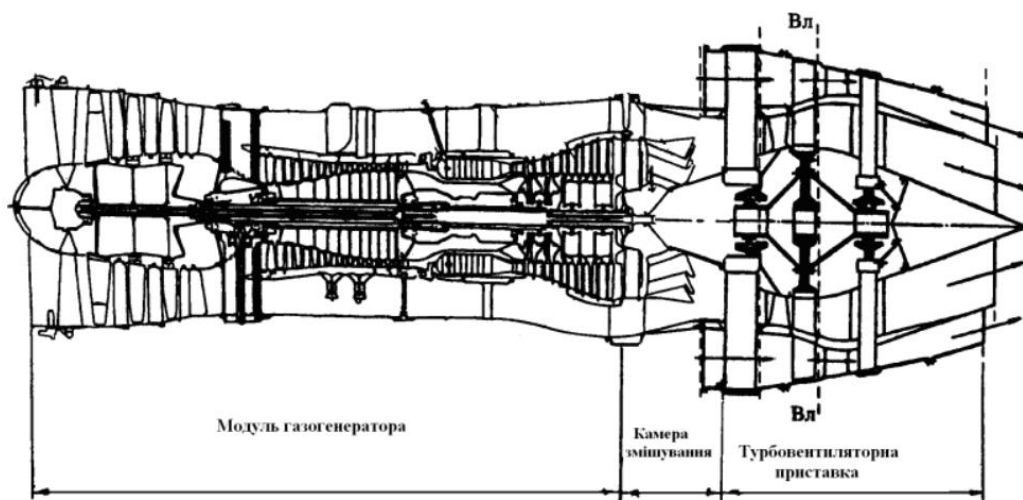


Рис. 1.15 – Схема ТРТД із заднім розміщенням турбовентиляторної [93]

Основні елементи триконтурного двигуна показані на рис. 8: вхідний напрямний апарат внутрішнього (газогенера-торного) контуру; 2 - компресор низького тиску першого та другого контурів газогенератора; 3 - канал другого контуру газогенератора; 4 - компресор високого тиску першого контуру газогенератора; 5 - камера згоряння газогенераторного контуру; 6,7 - багатоважна газова турбіна внутрішнього контуру; 8 - камера змішування газогенераторного контуру; 9 - вхідний напрямний апарат третього контуру; 10 – турбінний контур робочого колеса турбовентиляторної приставки; 11 – вентиляторний (третій) контур робочого колеса турбовентиляторної приставки; 12 - спрямовує апарат третього контуру турбовентиляторної приставки, 13 - реактивне сопло зовнішнього (третього) контуру; 14 - реактивне сопло внутрішнього контуру [93].

Через реактивне сопло внутрішнього контуру виходить газ, який виходить після перемішування камери змішування газового потоку першого контуру і повітря другого контуру. Цей газ створює тягу внутрішнього контуру ТРТД.

Через реактивне сопло виходить повітря, що проходить через вентиляторний контур турбовентиляторної приставки, який створює тягу зовнішнього контуру ТРТД.

Основна особливість робочого процесу ТРТД в порівнянні з робочим процесом ТРД полягає в тому, що в ТРТД для створення потужності турбіною турбовентилятора використовується енергія газового потоку, що виходить з змішування камери потоків першого і другого контурів.

У камері змішування відбувається обмін енергією між повітрям другого контуру газогенератора та газовим потоком за турбіною газогенератора. З камери змішування газ надходить у турбіну турбовентиляторної приставки і виходить з двигуна через сопло внутрішнього контуру [93].

## **ПРОБЛЕМИ ПРИ РОЗРОБЦІ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЇ ТРИКОНТУРНИХ ДВИГУНІВ**

Розміщення вентилятора на задній кромці крила створює складнощі з аеродинамікою, оскільки потрібно урахувати взаємодію з іншими компонентами крила та фюзеляжу, а також міняються характеристики потоку повітря. Вентилятор, розташований на задньому краї крила, може збільшити рівень шуму та вібрацій як у кабіні пасажирів, так і в кабіні екіпажу. Робочий процес двигуна може створювати значне теплове навантаження на задній край крила, що потребує ефективної системи охолодження та розподілу тепла. Триконтурні двигуни можуть бути важкими та великими, що вимагає вдосконалених інженерних рішень для їхнього встановлення та інтеграції в конструкцію літака. Також необхідно розробляти спеціальні системи керування та стабільності для забезпечення правильного функціонування літака з АFT двигунами, враховуючи їх вплив на керованість та поведінку в різних режимах польоту [94].

Після впровадження в експлуатацію АFT fan engine може зіткнутися з рядом проблем, які варіюються в залежності від конкретної конфігурації та умов експлуатації. Робочий процес двигуна може створювати значну кількість тепла, що може призвести до перегріву компонентів на задньому краї крила та потребує ефективної системи охолодження. Вентилятор на задньому краї крила може відбивати забруднення з землі, що може вплинути на ефективність двигуна та вимагати частішого технічного обслуговування. Доступ до двигуна для технічного обслуговування та ремонту може бути обмеженим через його розташування на задньому краї крила, що може ускладнити процеси технічного обслуговування. Встановлення триконтурного двигуна може збільшити масу літака та зсунути центр тяжіння, що може вплинути на його поведінку та керованість. Для експлуатації такого двигуна може знадобитися спеціалізоване обладнання та підготовлений персонал для обслуговування та ремонту [94].

## КАМЕРА ЗМІШУВАННЯ

Камери змішування застосовуються у двоконтурних турбореактивних двигунах. Особливістю будь-якого двоконтурного двигуна є поділ потоку повітря, що надходить двигун, на дві частини.

Частина повітря, що надходить у внутрішній контур, після стиснення в компресорі бере участь потім у процесі горіння палива. При подальшому розширенні продуктів згоряння турбіні за рахунок зменшення їх повної ентальпії забезпечується отримання роботи (і потужності), необхідної для обертання компресора [95].

Інша частина повітря після компресора низького тиску (вентилятора) надходить у зовнішній контур.

У двигунів зі змішуванням потоків потоки газу, що виходить з турбіни, і повітря, що проходить через зовнішній контур, перемішуються за турбіною в спеціальній камері, званої камерою змішування, і далі далі двигуна через загальне сопло.

Дослідження показують, що при досить повному перемішуванні потоків, що випливають з внутрішнього і зовнішнього контурів, можна отримати деяке збільшення питомої тяги і поліпшення економічності двигуна в порівнянні з двигуном без змішування потоків.

Призначенням камер змішування є забезпечення досить повного змішування потоку повітря із зовнішнього контуру з газовим потоком, що з турбіни [95].

Однак зазначений позитивний ефект від змішування потоків може наступити лише при незначному рівні гідравлічних втрат, що супроводжують процес змішування, а для повного перемішування потоків, якщо не вживати спеціальних заходів, зазвичай потрібна камера змішування, довжина якої значно перевищує її діаметр. Тому основними вимогами камер змішування є висока повнота змішування при незначних втратах повного тиску і мінімальних габаритних розмірах.

В триконтурних реактивних двигунах, потоки газу які виходять після камери згорання змішуються з потоком повітря з другого контуру і направляються на турбовентиляторну приставку. При відносно невеликих розмірах камери змішування потік з нерівномірним тепловим пограничним шаром направляється на лопатку турбіни, що призводить к великим тепловим наванатженням.

Підвещення економічних та ефективних характеристик газотрубинних двигунів може досягатись на основі рішення комплексного ряду задач, які визначені параметрами і характеристиками авіаційних силових установок та літальних апаратів. Одним з можливих варіантів підвещення ККД універсального модуля газогенератору є додавання турбовентиляторної приставки. В такому випадку треба вирішити ряд задач над оптимізацією характеристик двигуна з турбовентиляторною приставкою. В данній роботі ставится задача знайти оптимальні параметри камери змішування у двигуні з турбовентиляторною приставкою.

### SECTION 3. DEVELOPMENT OF MINERALS

DOI: 10.46299/ISG.2024.MONO.TECH.4.3.1

#### **3.1 Comprehensive analysis of the experience in recycling of coal mine dumps in the context of obtaining useful mineral resources**

It is difficult to overestimate the role of the coal industry for Ukraine, since coal is currently an important source of energy, is used in metallurgy and the chemical industry, and ensures the country's energy independence. The coal industry creates jobs for hundreds of thousands of citizens, makes a significant contribution to the country's budget through the payment of taxes, and is one of the most dominant among other fuel industries [96, 97]. Before the invasion of Russian troops on the territory of Ukraine, the coal-mining industry ranked fourth in Europe, which made it possible to obtain the status of one of the largest coal producers in the world. Experts estimate that Ukraine has 4% of the world's solid fuel reserves.

Despite the rapid development and significant potential of green energy, the level of its generation in our country remains low. According to International Energy Agency (IEA) [98], as of the beginning of 2022, hydro, solar, and wind power plants covered only 3.1% of the total domestic production level. Therefore, coal continues to be the main fossil fuel for electricity generation. Western Donbas has been and remains a strategic region for the coal industry, with mines mining thin coal seams, which in turn also has a number of environmental problems [99].

Underground and open-pit mining of coal deposits has a significant impact on the state of the natural environment, which is manifested by the release of rocks to the surface from mining operations, alienation of land for dumps, disturbance of the natural landscape of the earth's surface, pollution of atmospheric air and water bodies with by-products of coal mining [100, 101]. Waste rock dumps of mines are the main source of environmental pollution in coal-mining regions. They are associated with self-ignition of waste heaps and the emission of harmful gases/dust into the atmosphere of settlements, as well as water and soil pollution.

The problem of utilization of coal mine waste dumps can be solved by considering them as a source of valuable raw materials and energy. Each waste rock dump is unique in its composition and properties. To assess the possibility of their use, it is necessary to conduct a set of studies, collect and process information, and study the world experience in existing technologies for recycling waste rock-coal dumps. The problem of waste accumulation should be viewed not as a negative side factor of the coal-mining process, but as a possible prospect for the complete extraction of valuable components from the dumps. To date, leading countries have already implemented projects to manage waste rock dumps for their full utilization and restore the earth's surface to its natural state. In Ukraine, this issue is insufficiently studied, but all the prerequisites for the integrated and full utilization of dump waste rocks have already been created.

In order to solve the tasks set, in the course of the research, a comprehensive scientific-methodological approach is used, consisting in the analysis, systematization and generalization of information sources. The world experience in the management of coal-rock dumps and options for using the obtained products in various sectors of the national economy are presented. Possible options for extracting valuable components from coal mine dumps both in Ukraine and abroad are examined. The successfully implemented project for the construction of a processing plant directly at a coal dump in the United Kingdom is studied, which provides for a number of positive both economic and environmental aspects, allowing to form directions for utilization of accumulated coal waste.

The study [102] proposes options for using secondary resources for Ukrainian coal enterprises (Fig. 1). It has been found that in addition to extracting mineral elements from waste rocks, they can be used as an alternative fuel by briquetting. Briquettes are proposed to be produced using the method of extrusion vector impact. This technology makes it possible to produce fuel briquettes with specific electricity consumption for forming no more than 1.5 – 2.0 kW/ton.



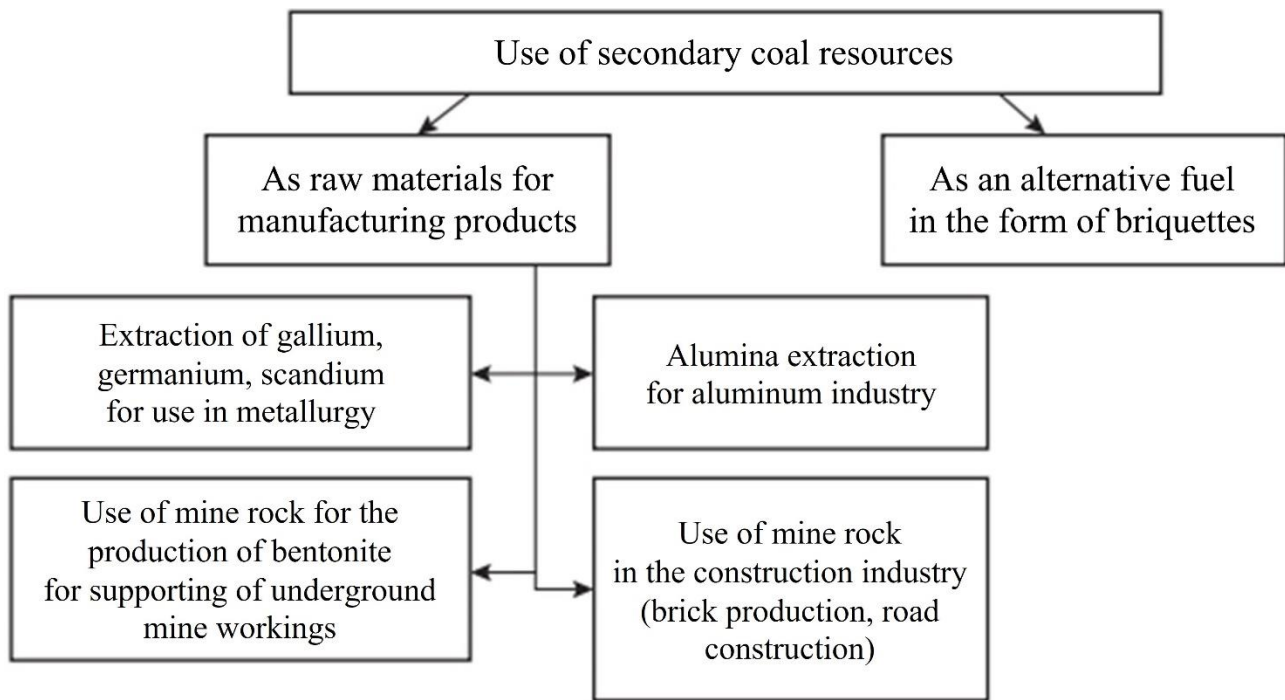


Figure 1. Possible options for using waste from coal enterprises

Coal briquettes produced in this way are proposed to be used as energy raw materials at power plants both for domestic consumers and for chemical, metallurgical and other industries.

M.I. Movchan and D.M. Akimov in their research [103] have found the suitability for the use of mine burnt rocks of the Lviv-Volyn coal basin in road construction. It is proposed to focus on the burnt rocks of coal mine heaps, which contain clay and coal shale with coal admixtures, carbonate and ferruginous minerals. It is these rocks that are recommended to be used for the production of highway pavements of IV and V categories and for intra-economic roads of III category.

A.H. Mnukhin and N.O. Mnukhina [104] propose technological schemes for complex recycling of dump waste rocks from mines to extract germanium, aluminum, rare-earth elements and iron-containing raw materials, the implementation of which may improve the environmental condition of coal-mining regions. The chemical composition of a number of coal mine waste dumps is analyzed in order to quantify the presence of mass fractions of oxides of various metals.

The authors [105] continued their research with the development of a magnetic separation method for extracting germanium from mining waste using an M-23 type electromagnet. A rock sample, taken from the Ilovaysk mine dump, serves as a feedstock, containing more than 20% of iron oxides in various compounds (according to chemical analysis data). The total mass of the material exposed to separation is 285 g, from which 41 g of iron-containing components are extracted. Further chemical analysis shows that the germanium content in iron-containing separated rocks is 5 g/ton.

The study [106] substantiates the resource value of burnt and unburnt dump waste rocks from coal mines, as well as the choice of directions for their use in the production of cementitious materials. The mineralogical composition of dump waste rock samples from coal mining is determined using X-ray diffraction analysis. Thus, it has been revealed that the rocks of the Olkhovatska Mine in Donetsk Oblast contain the following minerals: illite, quartz, brushite, hematite, and albite. Quartz, hematite, gypsum, clinocllore, and muscovite can be found in the unburned rocks of the dumps of the Sverdlov and Khmelnytska mines in Luhansk Oblast.

Grinchenko & Yushin in [107] propose to classify waste according to four main groups, which differ in the amount of accumulated materials, the degree of hazard, and the presence of valuable components in them. With regard to the mining industry, which is the basis of Ukraine's economy, it should be noted that the activities of coal enterprises generate two types of waste: overburden accumulated in dumps and sludge stored in tailings ponds.

As a typical example, the authors chose the Kryvyi Rih Iron-ore Basin of Ukraine, where 10 to 13 billion tons of overburden rocks have been accumulated in dumps. It has been determined that the dumps contain about 50 useful components that can be extracted and reused. The research proposes to consider the following types of technogenic deposits: iron ore tailings (500 million tons); manganese ore waste (150 million tons); alumina red sludge (1.2 – 1.3 million tons); titanium ore tailings; kaolin waste that can be processed into monazite concentrate (lanthanides and thorium).

Industrial experience in management of waste dumps was partially gained in Donetsk Oblast, the city of Snizhne. From 2005 to 2012, Coal Energy S.A. recycled

the dump waste rocks, creating the Snizhne Processing Plant No. 1 with a capacity of 1.2 million tons of dump waste rocks per year. In 2012, Snizhne Plant No. 1 exhausted the resources of the dumps located next to it and was dismantled. Since its commissioning, the plant has processed four dumps with a volume of 2.6 million m<sup>3</sup> of coal-bearing rocks. The recycled rock was used to fill a 5.2-hectare abandoned quarry and to clear 18 hectares of land areas from waste heaps (Fig. 2).

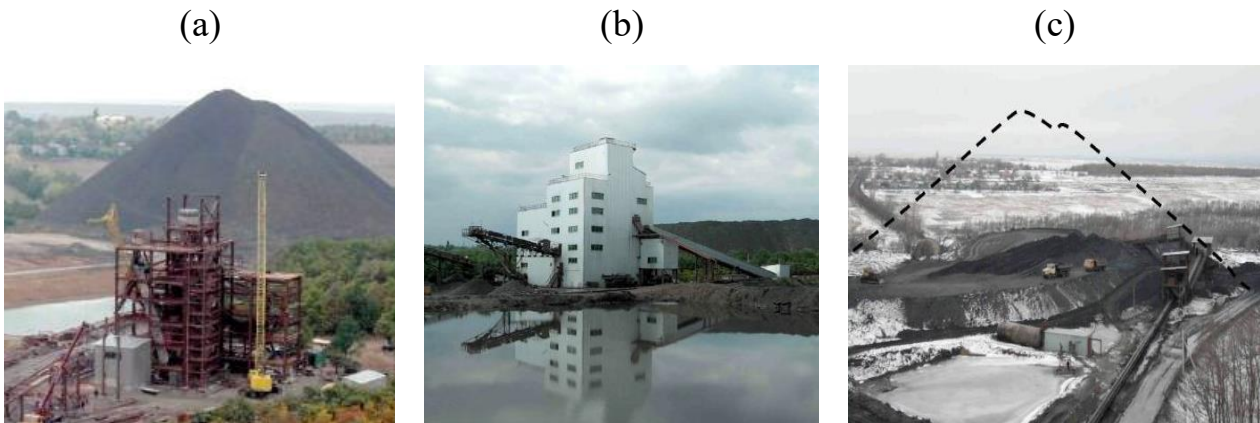


Figure 2. Beneficiation plant for processing dump waste rock mass: (a) the stage of construction and installation of the plant equipment; (b) view of the constructed plant module; (c) recycled dump and closed quarry filled with waste rock

In 2012, a new Processing Plant Snizhne No. 2 was commissioned to manage waste rock dumps with an annual processing capacity of 1.4 million tons of dump waste rock. It was planned to manage 3 waste rock dumps with a total volume of 7.2 million tons of rock mass in the city of Snizhne and clear 45 hectares of land areas [108]. It is believed that coal extraction is economically profitable when the coal content is at least 5%, the coal ash content is not more than 15 – 20% and the sulfur content is not higher than 1.5% [109].

The results of research [110] show the possibility of recycling waste rocks from coal mines as an aggregate in the production of concrete. The rocks are pre-crushed to obtain different fractions of the material, and then used to produce concrete. The experimental research results have shown that the aggregate samples with lithological

composition and alkaline-silica reaction indicators are fully compatible with natural aggregates and meet the requirements for the production of concretes.

In [111], the authors propose a possible approach to recover coal residues from the waste rock dump of the Jerada Coal Mine in Morocco and reuse the tailings for the production of environmentally friendly fired bricks. The process of manufacturing bricks includes several stages. The first stage is aimed at producing high-quality anthracite coal concentrate using crushing and froth flotation methods. Coal (organic matter) is recovered to increase the mechanical strength of bricks and reduce greenhouse gas emissions during the firing process. The second stage involves mixing the processed beneficiation tailings with a small amount of water, pressing and firing at an optimal temperature of 1020°C to produce environmentally friendly bricks. The separation of coal from the tailings improves the quality of fired bricks by increasing their bending strength, while reducing open porosity and water absorption.

Paper [112] proposes ways to implement the reuse and recycling of mining industry waste at the coal mines of Jincheng Anthracite Mining Group (Shanxi Province). The waste rock dumps of this enterprise have been turned into an artificial ecopark, fly ash is proposed to be used in construction materials, and water from coal mines is reused and recycled in closed pipelines.

High-carbon coal waste is proposed to be used for the production of construction materials and fillers [113]. Conducted research has shown that waste from the coal industry in Spain can be used as a filler in reinforced earth structures, road surfacing, and as a substrate for hydroponic crops (that is, when growing plants in artificial media without using soil). The obtained results made it possible to start the construction of 10000 m<sup>2</sup> greenhouse for growing tomatoes using the hydroponics method, where coal waste is used as a substrate. Moreover, the tests proved that the harvest can be obtained in the same quantities as that grown using traditional substrates (rock wool and perlite), which are much more expensive than coal waste.

Paper [114] presents the results of a comprehensive study of the physical-chemical properties of coal industry waste from the Lenger deposit (Kazakhstan). The research methods used are sieve, elemental, IR-spectral, microstructural, and X-ray

diffraction analyses. The research results provide evidence that coal-mining waste is a valuable secondary raw material for the production of new materials that can be used in the chemical and construction industries. Based on the scanning electron microscopy data, it has been determined that the waste composition is dominated by carbon, silicon and iron. In addition, there are trace elements in the form of magnesium, sulfur and aluminum.

In [115], the authors examine the possibility of using coal mine waste in the construction industry. It is proposed to produce sintered dense blocks from coal-mining waste by first crushing the waste to a certain size and then heat treating it at 850°C. In order to improve the quality of the final product, various production conditions are considered, leading to complete removal of coal and complete sintering of the samples. They also prepare bricks for masonry the size of ordinary construction bricks. The samples obtained have a sintered shell approximately 2 mm thick and a carbon content in the central zone similar to that of construction materials. Bricks from waste have porosity, hardness and other properties similar to ordinary bricks.

In [116], the authors conducted research on the recycling of coal mine waste from northwestern Spain to produce pozzolanic materials for use in the cement industry. The thermal activation of coal waste, the formation of its hydrate phases, and their evolution through pozzolanic reactions 1, 7, and 28 days after activation have been analyzed.

Coal industry waste has shown high pozzolanic activity after heat treatment at 600 and 900°C for 2 hours. The complete destruction of kaolinite occurs after the samples are held in an oven at 600°C for 2 hours. This temperature and time are best for activation. The compounds arising from the pozzolanic reaction in coal industry wastes activated at 600 and 900°C in the  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  system are stratlingite ( $\text{C}_2\text{ASH}_8$ ), tetracalcium aluminate hydrate ( $\text{C}_4\text{AH}_{13}$ ), layered double hydroxides, and monosulfoaluminate. When the temperature reaches 600°C, layered double hydroxides appear during the first 7 days of the reaction, while stratlingite is present as the main crystalline phase after 28 days of pozzolanic reaction.

In [117], the author has determined that the amount of coal in the waste of the Upper Silesian Coal Basin can reach 10% (ranging from 3 to 10%, assuming that the average coal content to be used is 5 – 7%). In this case, the volume of coal that can be mined from the Upper Silesian Coal Basin dumps is estimated at 45 million tons. The case of a coal-mining plant operating on a waste rock dump in Buków (Poland) is also discussed. (Fig. 3). The feasibility study on the example of this dump confirms the economic feasibility of coal extraction.



Figure 3. Coal plant in Buków (photo by Ł. Gawor)

Kien & Lanh in [118] examine the problem of reducing the amount of natural resources and shortage of raw materials for road construction, as well as the accumulation of huge volumes of coal industry waste (CIW) in the coal fields of the Quang Ninh coal-mining region (Vietnam). The conducted research has shown that coal waste can be used as a substitute for natural sand and Type II crushed stone in the construction of road surfaces in Vietnam, since its properties are almost identical to natural materials, which has been experimentally proven. Thus, coal industry waste aggregates have a good particle distribution, optimal moisture content, maximum dry



density, and CBR (California Bearing Ratio) value in the range of 89 – 123%. The study also focuses on the need for preliminary recovery of heavy metals and hazardous compounds that may be present in the CIW before applying the resulting aggregates to the main road surface, base and lower layers.

The use of coal waste in the production of construction materials, cement, cement mixture and concrete blocks is proposed by Santos et al. [119]. Fine aggregates for paving stones are usually river sand or artificial sand obtained by crushing rocks. However, the author's research has shown that it is possible to use waste from coal enterprises in the production of concrete paving stones.

The authors in [120], using the example of the United Kingdom's coal-mining complex, examine the problem of coal mine waste accumulation and propose possible ways to solve it. The paper describes an example of successful project implementation by RecyCoal Ltd. that implemented an environmentally friendly scheme for coal extraction from a waste rock dump and reclamation of a 30-hectare land area.

Preliminary laboratory tests showed that the yield of pure coal from the dump was 10.5%, which became a reasonable value for its extraction. The extraction and washing-out of about 4.5 million tons of waste made it possible to obtain 475 thousand tons of marketable coal and restore the area occupied by the dump during a 3-year period. The project envisaged the creation of a mini-plant using a single-module unit for coal extraction (Fig. 4), operating 24 hours a day from Monday morning to Saturday morning. Downtime was used to perform scheduled maintenance tasks.

The final rehabilitation of the project site made it possible to restore the land occupied by the dump, which provided for the planting of 8.8 hectares of forests and shrubs with 22 thousand new trees, 2 km of planting along the highway, 7.2 hectares of dead wood and 7.6 hectares of agricultural land.

RecyCoal Ltd. company has also patented a technology based on the process of Natural Medium Dual Density (NMDD). The technology includes a washing machine that works together with cyclones as a purification stage. Most waste rock dumps contain large amounts of clay, shale and argillite. Therefore, separators are provided to

extract a small portion of coal. Under these conditions, conventional processes in a dense medium are usually expensive and inefficient.

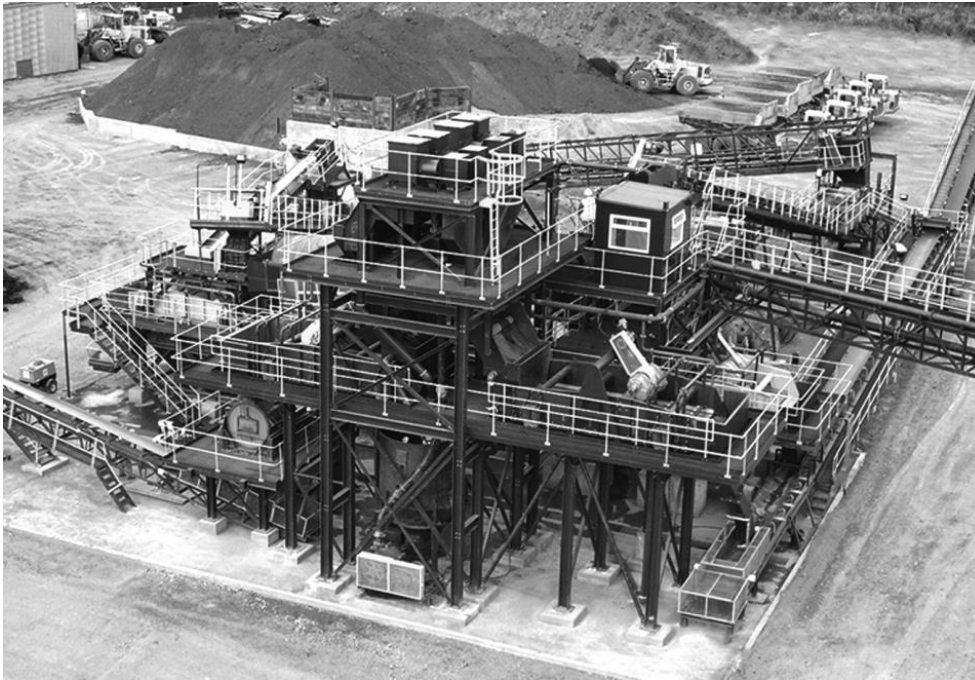


Figure 4. Processing Plant in Langton (Great Britain)

However, in the NMDD process, the specific gravity of the mineral material waste itself is quite sufficient to create a semi-stable aqueous suspension to separate the coal material as a controlled suspension medium (Fig. 5).

Paper [121] discusses the recovery of rare-earth elements and certain mineral concentrates from coal waste. Potential products that can be extracted from waste rock dumps also include various construction materials, such as road base, bricks and blocks, roofing materials, and agricultural materials such as soil additives and moisture-retaining granules. According to the authors, when assessing and selecting a coal waste management technology, key factors should be taken into account, including the location of the dump/mine, government policy, environmental impact, etc. Ways to utilize coal waste rock are shown in Figure 6.

Authors in [122] analyze and review possible methods to extract rare-earth elements (REEs) from coal, from by-products of its extraction, in particular from coal



dumps. Researchers study existing and potentially possible ways of obtaining REEs during beneficiation of coal and its waste. In addition, hydrometallurgical leaching of REEs from dump waste rock is examined.

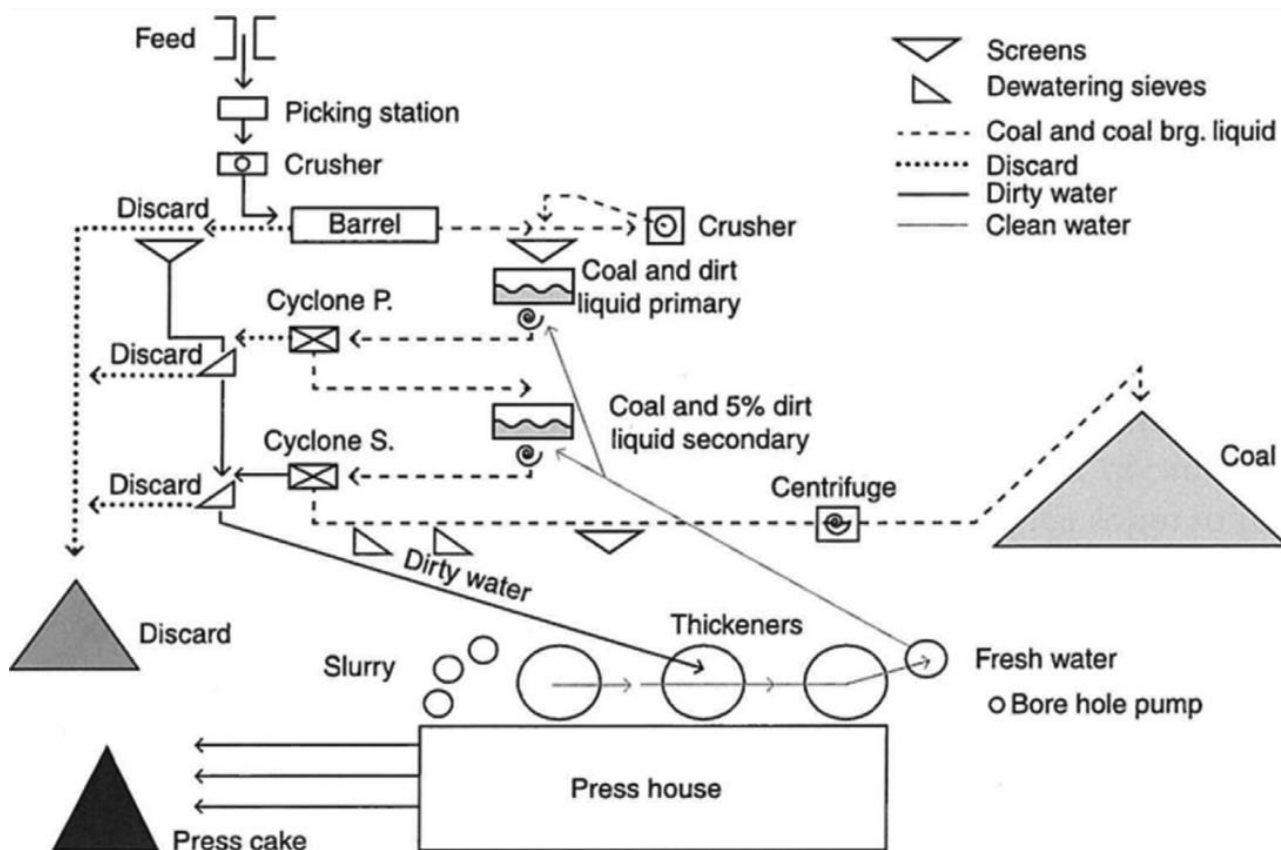


Figure 5. NMDD technology block diagram [121]

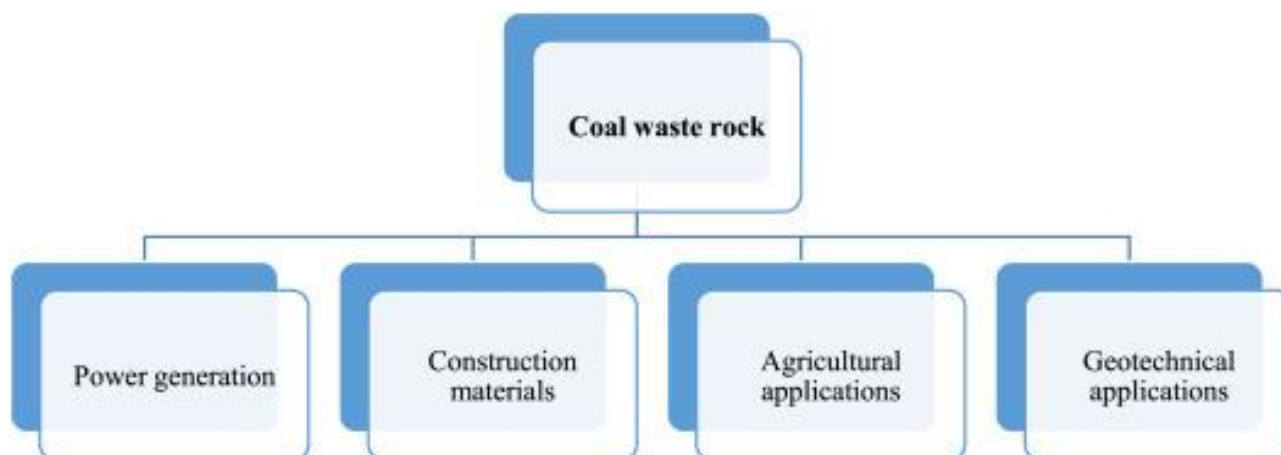


Figure 6. Ways of utilizing coal industry waste [121]

Paper [123] explores the possibility of extracting such elements as Ca, Cd, Co, Mg, Mn, Na, Ni, S, and Zn using the example of coal industry waste from the Douro deposit (Portugal). The geochemical composition of waste sampled from depths ranging from 3 to 15 m is analyzed. It has been found that the chemical composition of the studied samples is in good agreement with the results obtained in previous studies of the Douro coal deposit dumps.

In Ukraine, as of today, in Western Donbas, which is the main coal-mining region, the reserves of which are exploited by DTEK Pavlohradvuhillia, 9 waste rock dumps have been formed on the earth's surface as a result of underground coal mining activity of the following coal mines: Yuvileina (1), Stepova (2), Dniprovska (1), Zakhidno-Donbaska (1), Stashkova (1, the mine was closed in 2020), Ternivska (1), Samarska (1), Pershotravneva (1, the mine was closed). It is reasonable to consider these accumulations of waste rocks as a valuable source of mineral and raw material resources that should be industrially developed in the future.

Based on the study of the register of waste disposal sites in Dnipropetrovsk Oblast, which contains information on the parameters of accumulation sites, 9 waste rock dumps of Western Donbas mines have been graded by volume of accumulated rocks and the area occupied (Fig. 7). In addition, the location of all waste rock dumps can be identified using Google Earths, the general view of which is shown in Figure 8.

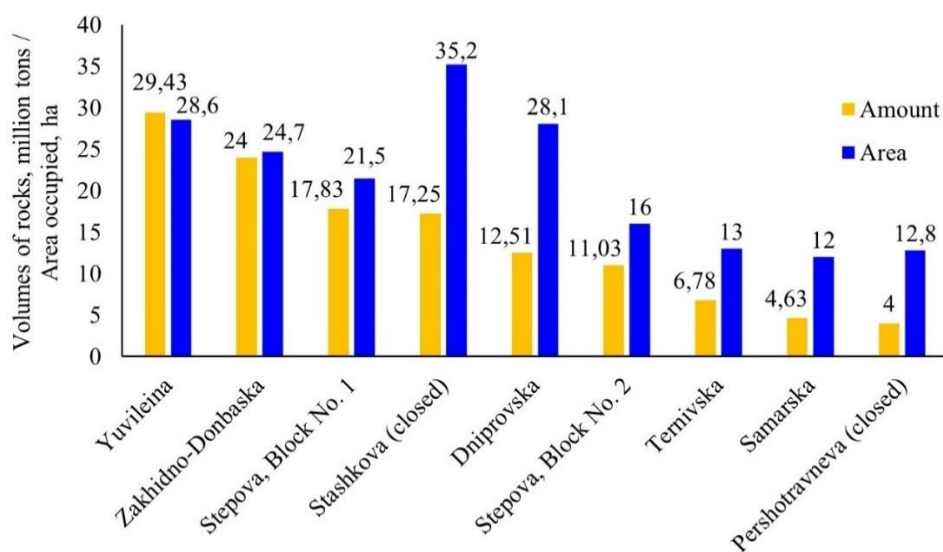


Figure 7. Gradation of waste rock dumps of coal mines in Western Donbas by volume of rocks and areas

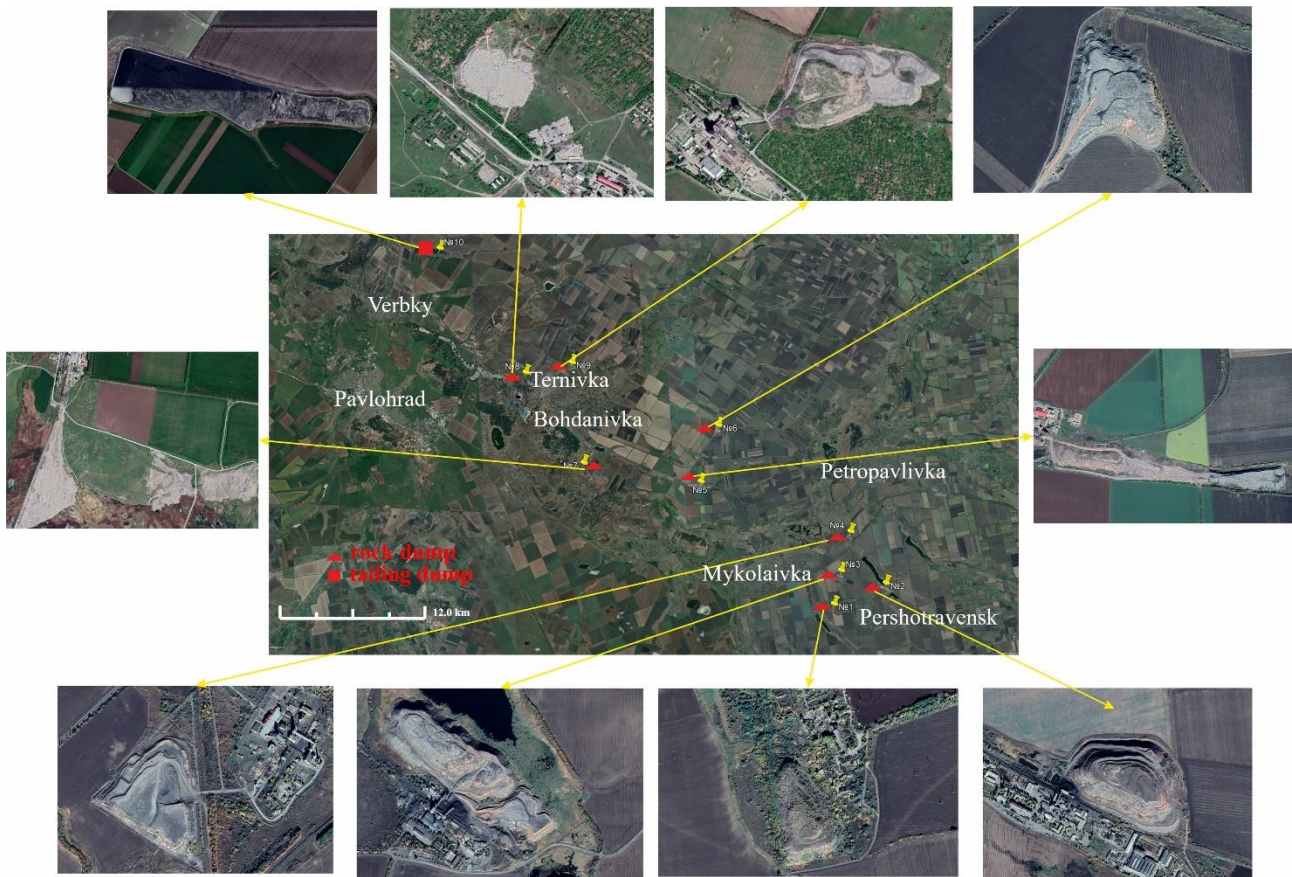


Figure 8. Overview map of main coal waste accumulations of PJSC DTEK Pavlohradvuhillia

Other coal mines, such as Heroiiv Kosmosu, Blahodatna (closed in 2020) and Pavlohradaska, do not have waste rock dumps, since the rock mass from the stoping and tunneling operations is combined into a single flow and supplied to the processing plant. Otherwise, mine waste rock is stockpiled at reclamation sites in the region. After beneficiation, large fractions are replenished to the dumps of other coal mines, while the fine fraction is transported to a tailings pond. In addition, mine waste rock, after being released to the surface, is immediately dumped at reclamation sites in the region (including advanced reclamation).

In Western Donbas, nearly 130 million tons of waste rock have been accumulated on the earth's surface, covering an area of about 190 hectares. If to compare the occupied area of 190 hectares with an average area of 1 field in Ukraine for agricultural crops of 17.9 hectares, then 11 new fields could be created on the site

of the waste rock dumps. Today, the annual volume of rock utilization ranges from approximately 30 to 40% and amounts to 2.5 – 3.0 million tons of waste rock. The main direction of utilization is the reclamation of the Samara River floodplain lands disturbed by mining operations and at the allocated advance reclamation site, where mine waste rock and beneficiation waste are stored. However, the annual volume of coal waste generated by mines in Western Donbas exceeds their utilization rate, which leads to a gradual accumulation of coal waste and the need to develop further programs.

The main mineral raw material component of the waste rock flow, which moves from the tunneling face to the earth's surface and is stockpiled into the waste rock dump, is represented by coal, argillite, siltstone and sandstone. Given that the rocks consist of argillite and siltstone, which are clay rocks, as well as sandstone, the content of sand and clay fractions in the dump rock mass is likely to be high, as they are also valuable construction components. These useful components are in great demand in the energy and construction industries today, and the design of technological lines for complex processing will make it possible to completely process these technogenic accumulations, return land areas and improve the environmental condition of mining regions.

In the context of the upcoming post-war reconstruction of the heavily damaged infrastructure of Donbas, the waste rock dumps of the PJSC DTEK Pavlohradvuhillia mines can become a significant source of the necessary mineral raw materials, since the waste rock dumps of the Donetsk region may be covered with mines.

From the above, it is obvious that the study and management of coal mine waste rock dumps is of interest not only from a mineralogical point of view, but also these studies are important in solving issues related to the use of coal-mining waste, which is a valuable secondary mineral raw material. Utilization of coal-mining waste helps to solve two crucial tasks at the same time: to use easily accessible and cheap mineral raw materials in production and to improve the environmental situation in the region by reducing the negative burden on the natural ecosystems of mining regions. This will in the future avoid many problems related to human health and environmental safety; minimize the social and economic consequences of the current situation; protect the

environment and resources from the harmful effects of the coal-mining process. The conducted comprehensive analysis shows that coal mine waste can be used in different directions: in road construction, as concrete aggregates, to produce bricks, expanded clay and ceramic products, mineral fertilizers, as well as for extracting rare-earth metals and valuable coal fractions, etc. In the context of the post-war restoration of the Donetsk region infrastructure, the importance of the availability and industrial development of waste rock dumps in the coal-mining region of Western Donbas is emphasized.

The analyzed known researches on the recycling of dump waste rock from coal mines are usually characterized by the study of obtaining a certain valuable resource or several: extraction of coal concentrate, use of raw materials for the construction industry, road construction, or production of fertilizers for agriculture. However, there is a lack of research on the complete complex recycling of dump waste rock mass, obtaining a wide range of resources and complete clearing of the land area, which should be the focus of attention of scientists, industrialists and ecologists in the coming years.

The research was performed within the framework of scientific-research work “Scientific and practical foundation of structural transformations of coal-mining enterprises based on innovative technologies for rational environmental management” (State Registration No. 0122U001301).

**SECTION 4. ELECTRICAL ENGINEERING**

DOI: 10.46299/ISG.2024.MONO.TECH.4.4.1

**4.1 Обладнання на світловипромінювальних діодах для екстракорпорального опромінення крові**

**Вступ**

Фототерапія є одним з методів фізіотерапії, що полягає в застосуванні ЕМВ (електромагнітного випромінювання) оптичного діапазону з лікувальною, профілактичною та реабілітаційною метою, що складається в активації адаптаційних і регуляторних механізмів організму. На сьогоднішній день, фототерапія є одним з методів фізіотерапії, який динамічно розвивається, що обумовлено рядом робіт в області визначення механізмів взаємодії електромагнітного випромінювання оптичного діапазону, з біологічними об'єктами на різних рівнях, а також застосуванням в якості випромінювачів нових штучних джерел ЕМВ [124]. Ведуться розробки нових і вдосконалення існуючих методик та апаратного забезпечення для впливу на різні галузі і структури організму людини. Останнім часом велика увага приділяється терапевтичному використанню неруйнівного і нетоксичного НІОВ (низькоінтенсивного оптичного випромінювання) лазерів і світлодіодів [125].

Лікувальна дія світла на організм людини відома здавна. Про геліотерапію знали стародавні єгиптяни, ассірійці, греки та інші народи, про неї неодноразово згадується в працях Гіппократа. Світлотерапія як наука почала формуватися в ХІХ столітті, після відкриття англійськими вченими Дж.Дауном і Р. Блунтом (1877 г.) лікувальних властивостей УФ випромінювання. У 1903 р датському фізіотерапевту Н. Фінсену була присуджена Нобелівська премія з фізіології та медицини за розробку і широке впровадження методики лікування аутоімунних і шкірних захворювань, за допомогою концентрованого світлового випромінювання.

Згодом, у великому числі експериментальних робіт, було показано, що синє світло змінює біохімічний склад крові, покращує роботу серця і легенів,



стимулює імунну систему, стимулює синтез АТФ, регулює метаболізм, покращує функцію зовнішнього дихання, доставки та утилізації кисню в клітинах, покращує проведення нервових імпульсів [126]. Оптичне випромінювання червоного та ІЧ (інфрачервоного) діапазонів покращує мікроциркуляцію крові в дрібних судинах і тканинах, підвищує швидкість окислювально-відновних реакцій, підсилює регенерацію пошкоджених тканин, нормалізує водний баланс клітин, має виражену судинорозширювальну, протизапальну, знеболюючу, лімфодренуючу і протинабрякову дію, підвищує місцевий і загальний імунітет [127, 128]. Низькоінтенсивне оптичне випромінювання (НІОВ) прискорює загоєння ран, має протизапальну, беззаспокійливу і захисну дію на клітини, перешкоджає їх загибелі від цитотоксичних факторів [129, 130, 131, 132, 133].

В даний час під низькоінтенсивним оптичним випромінюванням розуміють вплив випромінювання потужністю  $P = 10^{-3}-10^{-1}$  Вт, з довжиною хвилі  $\lambda = 300-10600$  нм, частотою пульсацій від  $f = 0$  (безперервне) до  $f = 5$  кГц, тривалістю пульсацій  $t = 1-500$  мс, міжпульсовим інтервалом  $t = 1-500$  мс, загальним часом впливу  $10-3000$  с, щільністю потужності (інтенсивністю)  $P_s = 0,01-10$  Вт/см<sup>2</sup> і сумарною дозою (потужність час опромінення / площа опромінення)  $D = 0,01-100$  Дж/см<sup>2</sup> [125].

Засобом для досягнення цілющих ефектів НІОВ є, перш за все, кров людини. Кров є найважливішою біологічною рідиною організму, що здійснює транспортну, живильну, регуляторну функції. Вплив НІОВ на кров чинить м'яке коригування системи саморегулювання і підтримання гомеостазу, здійснює регулювання, пряме або непряме, нормальних фізіологічних реакцій організму [134].

Існують наступні види опромінення крові.

#### 1. Внутрішньовенне лазерне опромінення крові.

Внутрішньовенне лазерне опромінення крові (ВЛОК) здійснюється *in vivo* шляхом подачі світла низькоінтенсивного лазера в судинний канал, як правило, в вену передпліччя, в припущенні, що терапевтичний ефект буде поширюватися

через кровоносну систему [134, 135, 136]. Найчастіше використовуються довжини хвилі з низькоінтенсивним лазерним випромінюванням (НІЛВ) 365, 405, 525 і 635 нм і потужністю 2-3 мВт. Терапевтичний ефект ВЛОК заснований на фотобіологічному впливі НІЛВ на формені елементи крові, активації біохімічних процесів, поліпшення механічних, транспортних, структурних властивостей мембран клітин, поліпшення реологічних і транспортних (в першу чергу киснево-транспортних) властивостей крові [137]. В кінцевому підсумку ефект ВЛОК на організм людини реалізується в поліпшенні функціонування органів і систем організму і призводить до зменшення патологічних проявів захворювань. Доведено, що при впливі НІЛВ на кров пацієнта, достатньо піддати опроміненню до 10-20% об'єму циркулюючої крові і спостерігати різні позитивні клінічні ефекти на рівні усього організму [137].

## 2. Кризьшкірне (над венне) лазерне опромінення крові.

При кризьшкірним (над венним) впливі лазерний промінь спрямований на неушкоджену шкіру в область великих кровоносних судин (наприклад, в бік загальної сонної артерії або надключичній області) [136, 138, 139]. У зв'язку з тим, що шкіра діє в якості бар'єру, поглинаючи енергію НІЛВ, потужність лазерного джерела доводиться значно збільшувати. На думку [136] цю проблему вирішить використання імпульсних матричних лазерних джерел світла.

## 3. Екстракорпоральне опромінення крові.

Використовується, в основному, для ультрафіолетового опромінення крові [138, 140, 141], включає в себе забір крові через вену і опромінення її поза тілом, в спеціальній кюветі. Раніше кров опромінювали за допомогою УФ ламп, зараз за допомогою лазера.

Екстракорпоральне ультрафіолетове опромінення крові (ЕУФОК) і подальша її внутрішньовенна реінфузія є найбільш відомим, поширеним і вивченим методом гемотерапії [142].

Історія застосування методу з лікувально-оздоровчою метою налічує вже майже 100 років. У 1928 р вперше в світі американські лікарі V. Hancock і E. Knott [141] успішно виконали реінфузію УФ-опроміненої крові двом пацієнтам,



що гинули від післяабортного сепсису і абсцесу мозку. Метод, запропонований V. Hancock і E. Knott, при якому УФ-опромінення аутокрові в кількості 180-220 мл вводиться внутрішньовенно, привернув увагу численних дослідників в США. Він знайшов застосування в терапії сепсису різної етіології, при обмеженому і розлитому перитоніті, гострої гнійної інфекції, ранах, що довго не гояться, вірусної інфекції [142]. Застосування ЕУФОК при гострих гнійних інфекціях попереджало септичні процеси. Метод ефективний при інфекціях, стійких до сульфаніламідних препаратів.

У Європі перша згадка про ЕУФОК відноситься до 1934 р. Чеській хірург Н. Navlicek [143], на відміну від V. Hancock і E. Knott, вводив УФ-опромінену кров внутрішньом'язово. Така методика давала задовільні результати при лікуванні алергічних, септичних і судинних захворювань.

Створення антибіотиків, їх ефективність при гнійної інфекції послабили інтерес до застосування ЕУФОК. Використання методу в клініці тривало; були отримані хороші результати при серцево-судинних, бронхо-легеневих та інших захворюваннях внутрішніх органів. У 1948 р E. Knott [141] повідомив про проведення ним 45 000 процедур, в 1955 р R. Olney [144] - 60 000 процедур. Цей метод в 1950-і роки був застосований для лікування вірусних гепатитів; також була рекомендована УФ-обробка консервованої крові і плазми з метою профілактики посттрансфузійного гепатиту. На початку 1960-х років в США з неясної причини припинилися публікації про лікувальну дію даного методу. З європейських країн лише в Німеччині, де було налагоджено серійне виробництво спеціального приладу («Тельта-Ультрамед»), тривало і триває застосування методу. В останнє десятиліття ЕУФОК застосовують переважно при судинної патології, хоча зустрічаються повідомлення і про проведення його при інших хворобах: псоріазі, цукровому діабеті, пієлонефриті і т. д. [142].

В СРСР, і згодом в країнах СНД, перші повідомлення про ЕУФОК з лікувальною метою відносяться до середини - кінця 1930-х років. У 1937 р. А. Філатов і Г. Касумов [142] застосували ЕУФОК при гіпоксичних станах, викликаних кровотечею, а Е.І. Сідельковская [145] кілька років по тому отримала

позитивний ефект у хворих з сепсисом після трансфузій донорської крові, опроміненої ультрафіолетом. У наступні роки з'явилися лише поодинокі повідомлення про лікувальну дію методу. Його впровадженню в клінічну практику в кінці 1970-х років сприяли роботи Л.В. Поташова і співробітників, які сконструювали апарат і використовували даний метод у хворих з хірургічною інфекцією [146, 147]. З початку 1980-х років починається досить бурхливе впровадження УФ-опромінення крові в різні галузі клінічної медицини, з'являються повідомлення про можливість використання методу в спортивній медицині і навіть в ветеринарії [142]. Сприятливим поштовхом до такої події послужило початок серійного випуску вітчизняного апарату «Ізольда», а також поява інших пристроїв.

В даний час метод ЕУФОК завоював міцне місце в арсеналі методів гемотерапії завдяки своїй доступності та простоті виконання, а також високій ефективності при багатьох патологічних станах. Сучасне технічне забезпечення методу ЕУФОК і отримання все нових даних про механізми безпосереднього впливу ультрафіолету на кров і опромінення аутокрові на організм зумовили популярність методу серед вітчизняних клініцистів.

В умовах підвищеної захворюваності в зимовий час і міжсезоння метод дає відмінну можливість захистити організм від вірусної атаки. Під дією ультрафіолетового опромінювання клітини крові оновлюють захисну мембрану, необхідну при вірусному навантаженні для збереження імунітету. В даний час, при активному поширенні коронавіруса, УФОК крові став відмінним засобом запобігання зараження COVID - 19, а також частиною комплексної терапії.

Практично все сучасне фототерапевтичне обладнання, яким впливають ЕУФОК, ЕЛОК та ВЛОК на організм, створено із застосуванням лазерів. (Це такі прилади як Ізольда-ЕЛОК, Матрикс-ВЛОК, Соларіс, Юлія і ін.).

Прилади на основі лазерів небезпечні, досить дорогі, вимагають спеціальної підготовки персоналу. Виникає необхідність вивчення можливості використання замість приладів на основі лазерів більш безпечних, дешевих, більш простих в експлуатації джерел випромінювання - світлодіодів.

Їх вартість в кілька разів менша за вартість лазерів, що випромінюють ті ж довжини хвиль. У світлодіодів менший ризик передозування, менше деструктивних змін в клітці на молекулярному рівні, ніж у лазерів. Ці та інші обставини дозволяють вважати, що лазери в терапії можуть бути замінені світлодіодами.

Переваги світлодіодних апаратів для фототерапії:

- відсутність численних протипоказань, характерних для лазерної терапевтичної апаратури;

- велика розбіжність пучка випромінювання дозволяє впливати на значну площу тіла (рани, виразки, опіки і т.д.) без застосування спеціальної розфокуруючої оптики;

- істотно менше енергоспоживання забезпечує економічність в роботі, більш високу ступінь безпеки користувачів;

- невеликі розміри і маса дозволяють використовувати прилади практично в будь-яких умовах в стаціонарі, поліклініці, амбулаторії та в побуті.

Нові сучасні світлодіодні апарати для фототерапії дозволяють отримати ефект аналогічний застосуванню дорогих терапевтичних лазерів і відповідають всім сучасним вимогам, пред'явленим до медичної апаратури, а саме: точність і стабільність установки параметрів впливу; висока ефективність; простота експлуатації і обслуговування; безвідмовність в роботі; компактність і малу вагу; відносно низька вартість.

З вищевикладеного випливає, що частина світлодіодних апаратів у ряді фізіотерапевтичних приладів буде продовжувати рости і складати конкуренцію терапевтичним лазерам.

Рядом біофізичних методів були проведені власні дослідження щодо ефективного впливу електромагнітного випромінювання (ЕМВ) оптичного діапазону на еритроцити людини. Об'єктом дослідження в еритроцитах був так званий примембранний водний шар еритроцитів [148, 149, 150]. Досліджувався вплив ЕМВ оптичного діапазону на ефективну товщину примембранного шару еритроцитів  $\delta$  (в неопромінених зразку  $\delta = 2,57 \cdot 10^{-5}$  м) [149, 150, 151]. Було

встановлено, що УФ-опромінення (опромінення велосою газорозрядною ртутною лампою типу ВМТ) ( $\lambda = 253,7$  нм) зменшує товщину примембранного шару на 25%; селективне опромінення спектральними лініями (газорозрядної ртутної лампи типу ВМТ) ( $\lambda = 312,6$  нм) і ( $\lambda = 577$  нм), а також опромінення еритроцитів «жовтим» світлодіодом ( $\lambda = 592$  нм) дають зменшення примембранного шару на 18%. Вплив гелій-неоновим лазером ( $\lambda = 640$  нм) зменшило примембранний шар на 16%. Зменшення ефективної товщини примембранного водного шару змінює швидкість обмінних процесів в системі «клітина - міжклітинне середовище», тим самим змінюючи режим функціонування клітини. Змінений режим функціонування є біологічною відповіддю на опромінення вище переліченими довжинами хвиль. Еритроцити зі зміненим режимом функціонування, стають сигналами-подразниками, які змушують організм мобілізувати ресурси на боротьбу з патологією. Ці обставини розширюють пошук нових ефективних терапевтичних прийомів, які використовують опромінення УФ і хвилями видимій області світла. Дані обставини можуть прогнозувати створення обладнання для фототерапії з певними параметрами впливу. Слід зауважити, що апаратура для екстракорпорального опромінення крові розроблялася, в основному, для УФ діапазону довжин хвиль. Є дані про апаратуру на довжинах хвиль 640-650 нм. Апаратура для екстракорпорального опромінення крові, що працює в діапазоні довжин хвиль 530-590 нм, раніше не розроблялася.

Отже, необхідно провести розрахунок параметрів фототерапевтичного обладнання для екстракорпорального опромінення крові на базі світловипромінювальних діодів. Прототипами досліджуваного фототерапевтичного обладнання були широкофункціональні терапевтичні лазерні і лампові прилади. Недоліком прототипів була їх висока вартість, громіздкість, необхідність спеціального приміщення для проведення процедур, спеціальна підготовка персоналу відповідно вимогам до роботи з лазерними установками.

### Мета роботи

Метою роботи є розробка фототерапевтичного обладнання для екстракорпорального опромінення крові на базі світловипромінювальних діодів, використовуючи результати власних досліджень.

### Регулювання параметрів впливу для забезпечення заданої дози.

Проведення процедур фототерапії полягає в опроміненні деякої ділянки тіла або всього пацієнта, а в даному випадку зразка крові пацієнта, ЕМВ з певними параметрами впливу. Дані параметри впливу, діапазони їх регулювання визначаються застосовуваної методикою фототерапії та реалізуються апаратним забезпеченням. Відсутність конкретних значень параметрів впливу часто пов'язано з індивідуальними особливостями протікання різних патологічних процесів. Забезпечення можливості регулювання більшого числа параметрів дозволяє здійснювати вплив з максимальним терапевтичним ефектом.

При впливі процедур фототерапії основними параметрами впливу є величини: інтенсивності випромінювання  $I$ ,  $[Вт/м^2]$  і яскравості джерела випромінювання  $L_v$ ,  $[Кд/м^2]$ .

Вираз для розрахунку інтенсивності випромінювання, що випускається одним джерелом світла, має вигляд:

$$I = \frac{P}{S} = \frac{\Phi_E}{S}, \quad (1)$$

де  $P$  - потужність випромінювання, Вт;

$S$  - площа, що піддана випромінюванню,  $м^2$ ;

$\Phi_E$  - потік випромінювання, що випускається одиничним джерелом, Вт.

Яскравість джерела випромінювання можна розрахувати з виразу:

$$L_v = \frac{I_v}{S} = \frac{\Phi_v}{\Theta \cdot S}, \quad (2)$$

де  $I_v$  - сила світла - кількісна величина потоку випромінювання, що припадає на одиницю тілесного кута в межах його поширення, Кд ;

$\Phi_v$  - світловий потік - фізична величина, яка характеризує кількість енергії, яка сприймається органом зору у відповідному потоці випромінювання, Лм;

$\Theta$  - тілесний кут - частина простору, обмежена деякою кінечною поверхнею, ср.

Кількісно вплив ЕМВ оцінюється щільністю дози  $D$  [152], що представляє собою інтенсивність випромінювання, яким піддається поверхня біооб'єкту протягом деякого часу  $T$ . Це основний параметр, що характеризує біологічні ефекти, викликані впливом ЕМВ. Щільність дози в фототерапії має розмірність Дж/см<sup>2</sup> і розраховується виходячи з (1) і (2) наступним рівнянням:

$$D = I \cdot T = \frac{P \cdot T}{S}, \quad (3)$$

Здійснення регулювання основних параметрів впливу для досягнення найкращого терапевтичного ефекту, дозволяє здійснити підбір оптимальних інтенсивностей і щільності доз в широкому діапазоні. Найбільш поширеними методами регулювання щільності дози впливу є зміна значень потужності випромінювання і тривалості опромінення. Площа, на яку впливають опроміненням квазістала, тому що визначається обраною методикою процедури фототерапії та конструктивними особливостями випромінювачів, що застосовуються для її проведення. Тому в літературі майже завжди мова йде не про щільність дози впливу, а лише про дозу впливу.

Підвищення ефективності методик досягається за рахунок застосування різних видів модуляції випромінювання ЕМІ. На практиці в фототерапії найбільш часто застосовують імпульсну модуляцію, яка описується наступними параметрами:

- тривалість імпульсу ( $\tau_I$ ), час коли відбувається випромінювання;
- тривалість періоду модуляції ( $T_M$ );
- частота модуляції ( $F_M$ ), зворотно пропорційна величині періоду;
- шпаруватість ( $Q$ ) - відношення періоду до тривалості імпульсу.

Основною причиною застосування імпульсної модуляції є прагнення до підвищення ККД приладу. Крім цієї причини в літературних джерелах є дані про те, що до безперервного сигналу біологічні об'єкти швидко адаптуються [152]. У той час як на імпульсний вплив біологічна відповідь буде більш яскравою.

З урахуванням режиму широтно-імпульсної модуляції, а також змінами частоти модуляції і тривалості імпульсів вираз (3) прийме вигляд:

$$D = \frac{P_{\max} \cdot T \cdot F_M \cdot \tau_{II}}{S}, \quad (4)$$

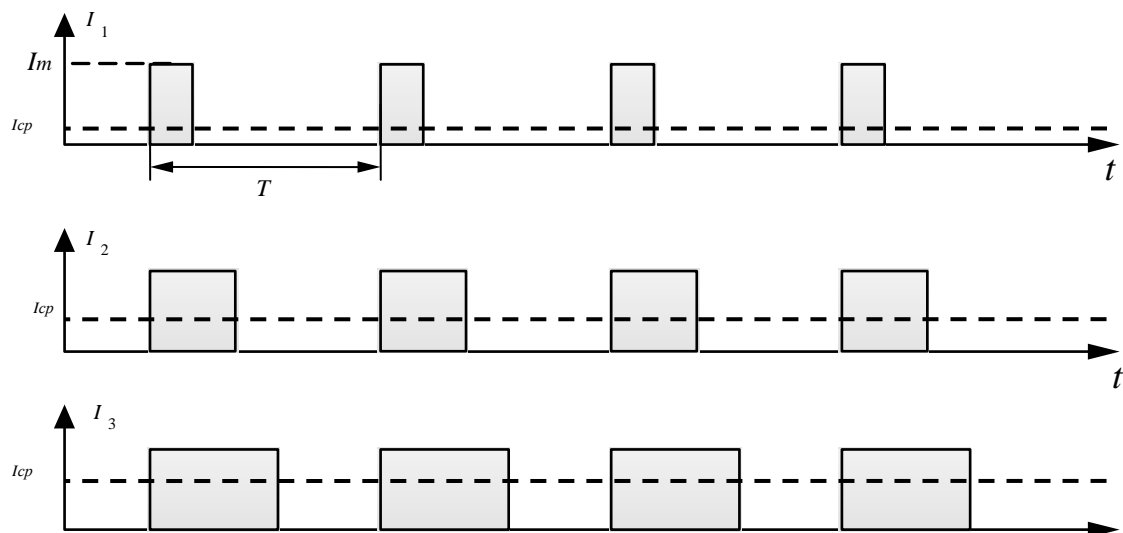
Цей вираз (4) дозволяє визначити щільність дози (далі дозу), що подається на опромінюваний зразок без урахування кількості відбитого випромінювання. Так як практично всі біологічні об'єкти є сильно розсіюючими середовищами, то частина випромінювання, що проникла в біооб'єкт, повертається назад, формуючи так зване дифузне відбиття. Кількість відбитого випромінювання характеризується коефіцієнтом відбиття  $R(\lambda)$ , яке є сумою дзеркального і дифузного відбиття. Значення цього коефіцієнта - складно залежна величина від довжини хвилі випромінювання, у видимій частині спектру змінюється від 20 до 50%.

Значення поглиненої дози випромінювання з урахуванням коефіцієнта відбиття матиме вигляд [124]:

$$D = \frac{P_{\max} \cdot (1 - R(\lambda)) \cdot T \cdot F_M \cdot \tau_{II}}{S}, \quad (5)$$

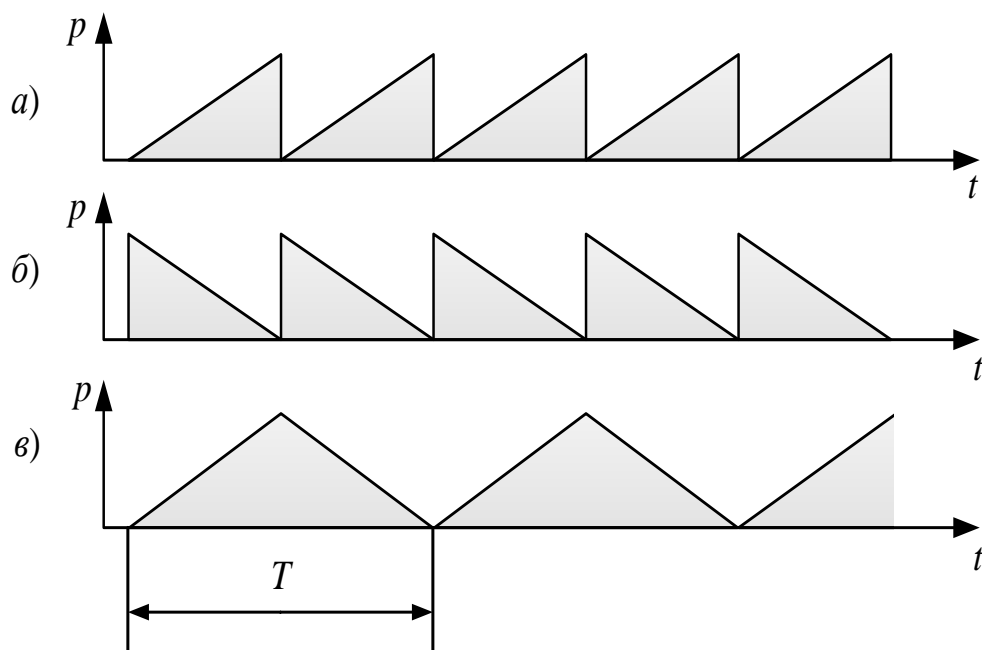
Розрахована доза, виходячи з виразу (5), є достовірною величиною, так як мова йде про випромінювання, поглинуте біооб'єктом (в нашому випадку - зразком крові) що викликало відповідні фізико-хімічні реакції. Такий розрахунок щільності дози, виходячи з (5) більш інформативний для медичного персоналу.

За допомогою широтно-імпульсної модуляції (ШІМ) регулюється середнє значення струму, а значить, відповідно і потужність випромінювання (інтенсивність) кожної групи світловипромінювальних діодів (СВД). Тимчасові діаграми, що характеризують зміни струму при ШІМ, представлені на рис.1.



**Рисунок 1.** Вид імпульсів струму СВД (тимчасові діаграми) при різних величині струму, де  $I_1 < I_2 < I_3$ .

Потужність випромінювання, в залежності від обраної методики впливу, може залишатися як сталою за час експозиції, так і змінюватися за заданим законом. Найбільш доцільними є наступні закони регулювання потужності випромінювання (рис.2):



**Рисунок 2.** Тимчасові діаграми зміни потужності випромінювання:

- а) - по лінійно-наростаючому закону; б) - по лінійно-спадаючому закону;
- в) - за законом трикутника.



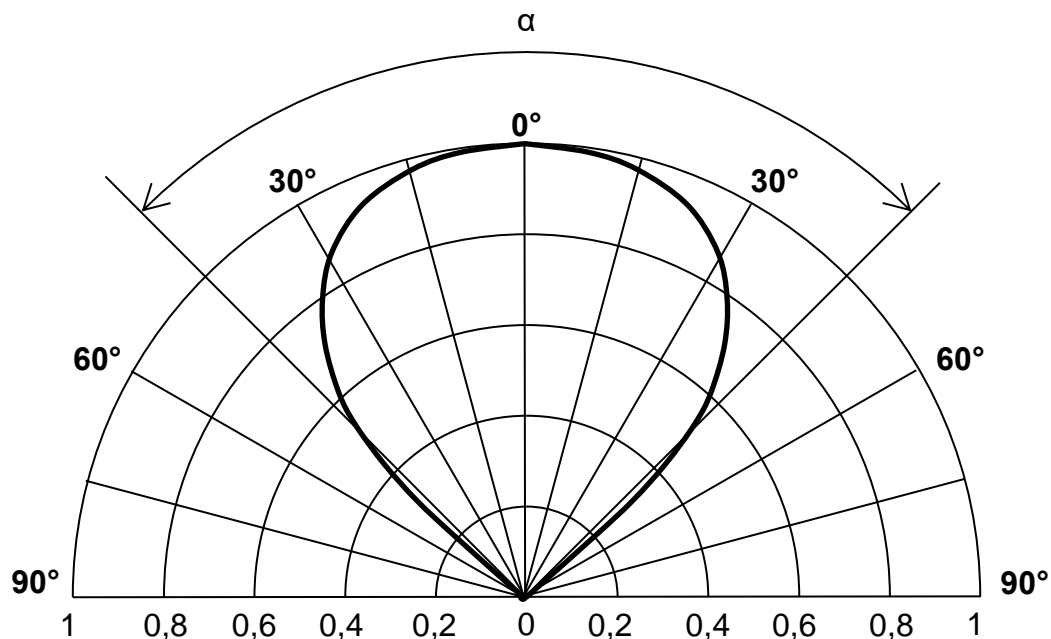
Подальші дослідження покажуть найбільш ефективні закони регулювання потужності випромінювання.

### **Розрахунок параметрів матриць світловипромінювальних діодів**

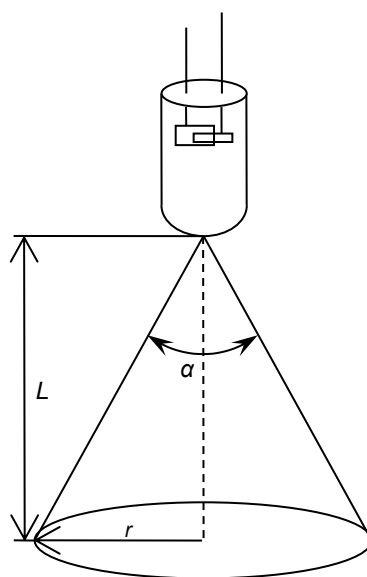
Для того щоб, забезпечити належний фототерапевтичний ефект, необхідно точно розрахувати дозу впливу випромінювання, що надходить від джерела до об'єкта (в даному випадку - зразка крові пацієнта).

У запропонованій моделі приладу застосовані групи випромінювачів - СВД, які рівномірно розміщені на прямокутній матриці. Передбачено розміщення на матриці 3-х груп СВД, що розрізняються по довжині випромінюваних хвиль (1-а –  $\lambda = 310\text{--}320$  нм, 2-а –  $\lambda = 530\text{--}590$  нм, 3-я –  $\lambda = 640\text{--}650$  нм). Маючи в своєму розпорядженні відповідні групи СВД різних довжин хвиль на одній матриці, ми можемо створювати опромінення в кожному із зазначених діапазонів спектра. Відповідно, СВД кожної групи рівномірно розташовані в прямокутному полі (фотонному полі), утворюють умовну геометричну сітку. Власне, СВД розташовуються у вузлах умовної геометричній сітки. Від відстані між вузлами цієї сітки залежить взаємне накладення потоків випромінювання від СВД, що є визначальним при конструюванні матриці фототерапевтичних випромінювачів як найважливішої частини передбачуваної моделі приладу.

Одиничний СВД формує випромінювання, яке при досягненні поверхні об'єкта дає на ній світлову пляму в формі кола з радіусом, який визначається у вигляді функції від кута діаграми спрямованості СВД ( $\alpha_{\max}$ ) і відстанню до поверхні  $L$  по нормалі (рис. 3, 4).



**Рисунок 3.** Діаграма спрямованості циліндричного світлодіода з кутом  $90^\circ$



**Рисунок 4.** Найбільш поширена конструкція світлодіода у вигляді циліндричної колби з лінзою. Геометричні параметри поширення випромінювання, який формується СВД

Величина потоку випромінювання, що взаємодіє зі зразком в межах світлової плями, описується наступним виразом [124]:

$$\Phi_E(\alpha) = \frac{2\pi \cdot (1 - \cos\alpha_{\max})}{K_M \cdot V_\lambda} \cdot \int_0^{\alpha_{\max}} I_V(\alpha) \cdot (1 - R(\alpha)) d\alpha, \quad (6)$$

де  $K_M$  - фотометричний еквівалент випромінювання, що дорівнює 683 Лм/Вт,

$V_\lambda$  - функція видимості,

$I_V$  - величина потоку випромінювання, що припадає на одиницю тілесного кута в межах його поширення (сила світла), Кд,

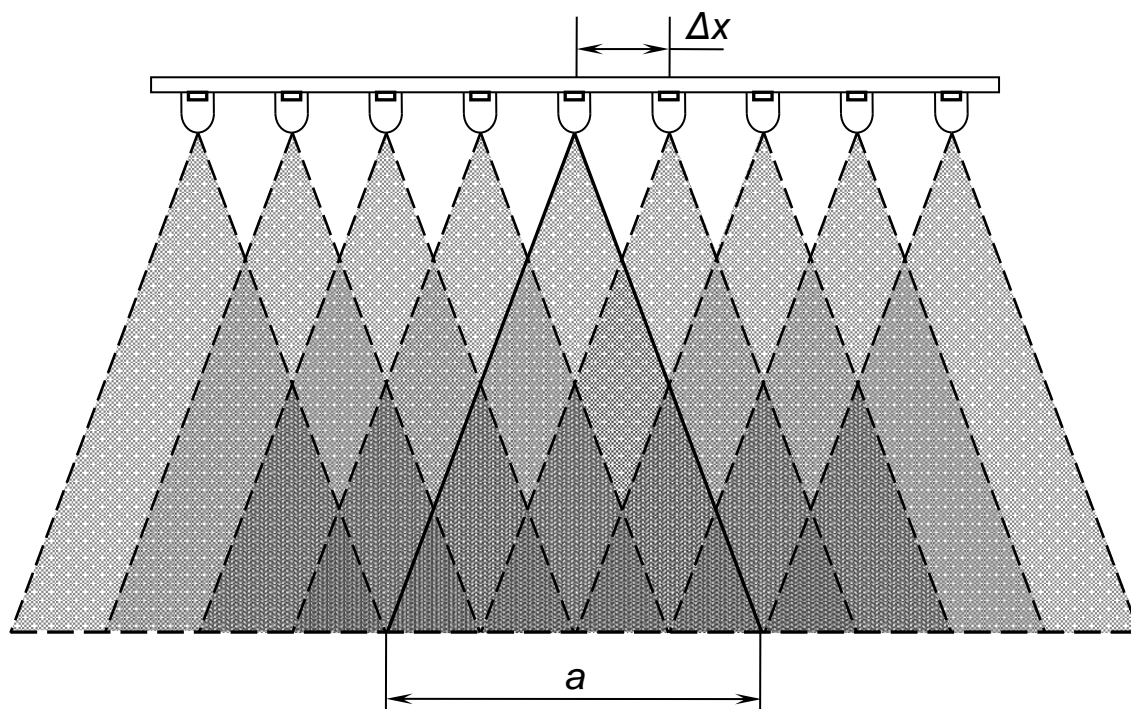
$R(\alpha)$  - коефіцієнт відбиття від об'єкта.

Розрахунок відстані між СВД, рівного  $\Delta x$  при складній залежності розподілу потоку випромінювання є непростим завданням. Для спрощення, припустимо, що кожен СВД створює на поверхні світлову пляму приблизно квадратної форми з рівномірно розподіленим потоком випромінювання. Сторону квадрата покладемо рівною  $a$ , яку будемо розраховувати наступним чином:

$$a = 2 \cdot L^2 \cdot \operatorname{tg}^2(\alpha / 2), \quad (7)$$

У виразі (7) введений кут половинній яскравості, який є одним з основних параметрів, що вказуються в технічних характеристиках СВД.

На елементарній ділянці світлового поля (площа поверхні, що опромінюється одним СВД), відбувається накладення потоків випромінювання від самого джерела, яке розташовано в геометричному центрі і від сусідніх, що знаходяться на деякій відстані. Сума потоків випромінювання від сусідніх джерел фотонного поля, які накладаються, зворотно пропорційна відстані до геометричного центру елементарної ділянки та стає рівною нулю за умови  $\Delta x \geq a$ , см. рис. 5.



**Рисунок 5.** Принцип накладення потоків випромінювання від фотонного поля.

Основним параметром дозування впливу на опромінюваний об'єкт є інтенсивність. Для елементарної ділянки фотонного поля інтенсивність розраховується виразом:

$$dI = \frac{\Phi_E}{a^2}, \quad (8)$$

Інтенсивність випромінювання  $dI_{\max}$  на елементарній ділянці, при накладенні від декількох СВД, розташованих в один ряд, можна розрахувати за допомогою формули, що наведена в [124]:

$$dI_{\max} = dI \cdot \left[ 2 \cdot \sum_{i=1}^n \left( 1 - \frac{i \cdot \Delta x}{a} \right) + 1 \right], \quad (9)$$

де  $n$  - кількість СВД, які розташовуються від геометричного центру елементарної ділянки до відстані, на якому відсутні накладення, можна визначити з рівняння:

$$n = a / \Delta x, \quad (10)$$

Вираз (9) може бути перетворено до більш зручного для розрахунків вигляду:

$$dI_{\max} = dI \cdot \frac{a}{\Delta x}, \quad (11)$$

а для елементарного майданчика з кількома рядами:

$$dI_{\max} = dI \cdot \frac{a}{\Delta x} \cdot \frac{a}{\Delta y}, \quad (12)$$

де  $\Delta x$ ,  $\Delta y$  - відстані між світлодіодами по вісям  $X$  і  $Y$ .

З виразу (12) можна розрахувати відстань між світлодіодами, задавши одне зі значень  $\Delta x$  або  $\Delta y$ . Тоді вираз матиме вигляд:

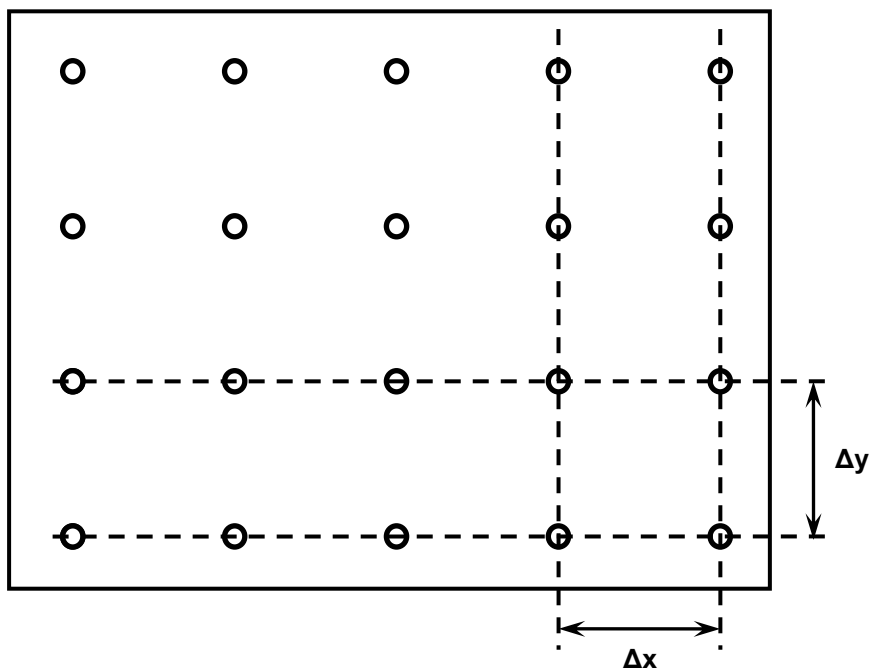
$$\Delta x = \frac{a^2}{\Delta y} \cdot \frac{dI}{dI_{\max}}, \quad (13)$$

На краях світлової плями утворюються області з меншою кількістю накладень, відповідно інтенсивність на цих ділянках зменшується. Такі області не враховуються при розрахунку світлової плями, сформованої фотонним полем, а величина фотонного поля повинна бути не менше площі об'єкта, що опромінюється. Величина області з меншою інтенсивністю буде однаковою з усіх країв фотонного поля, а її значення буде дорівнювати ширині елементарної ділянки  $a$ .

При конструюванні випромінювачів типу фотонного поля початковими параметрами є значення максимальної інтенсивності випромінювання  $I_{\max}$ , максимальної площі, яка підлягає впливу, із зазначенням ширини  $X$  і довжини випромінювача  $Y$ , а також відстані від фотонного поля до об'єкта  $L$ . Джерела ЕМВ можуть мати одну довжину хвилі, або використовується їх комбінація. Розрахунок відстані проводиться для кожної групи окремо.

Використовуючи вирази (6) - (8) можна розрахувати середнє значення інтенсивності на елементарній ділянці світлової плями і відстані між СВД, за умови  $\Delta x = \Delta y$  (див. рис. 6), яке розраховуємо з рівняння:

$$\Delta x = \Delta y = a \cdot \sqrt{\frac{dI}{dI_{\max}}}, \quad (14)$$



**Рисунок 6.** Випромінювач типу фотонного поля із зазначенням ширини  $\Delta x$  і довжини  $\Delta y$  (відстані між СВД).

Кількість світлодіодів в рядах по ширині  $N_x$  і довжині  $N_y$  визначається з урахуванням необхідної площі світлової плями виразами [147]:

$$N_x = \frac{X + 2a}{\Delta x} - 1 \quad (15)$$

$$N_y = \frac{Y + 2a}{\Delta y} - 1 \quad (16)$$

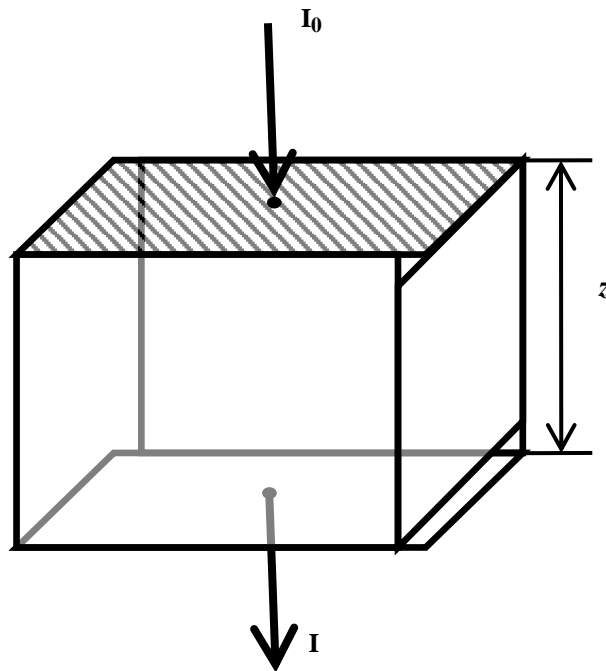
Таким чином, знаючи потужності відповідних діодів, кут половинної яскравості і відстань від матриці світлодіодів до об'єкта, можна розрахувати відстань між СВД, а також розрахувати інтенсивність для елементарної ділянки фотонного поля.

**Розрахунок величини інтенсивності випромінювання для  
низькоінтенсивного опромінення еритроцитів різними довжинами хвиль**

Для роботи приладу на світлодіодах для низькоінтенсивного екстракорпорального опромінення крові необхідно знати величину

інтенсивності випромінювання, що падає на зразок крові, величину інтенсивності випромінювання, поглиненої біооб'єктом, температуру, на яку (або до якої) його можна нагрівати, впливаючи випромінюванням відповідних СВД.

Уявімо наш зразок крові у вигляді куба зі стороною грані куба, що дорівнює  $z$ , див. рис. 7.



**Рисунок 7.** Зразок крові у вигляді одиничного куба зі стороною рівною  $z$  (1 см).

Випромінювання, що формується матрицею СВД, падає на поверхню зразка крові з інтенсивністю  $I_0$ . При проходженні через кров відбувається ослаблення інтенсивності, відповідно до закону Бугера-Ламберта-Бера, і визначається виразом:

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu z} , \quad (17)$$

де  $\mu$  - коефіцієнт поглинання крові, а  $z$  - товщина шару, через яке проходить випромінювання.

Відповідно, інтенсивність поглиненого випромінювання буде

$$I_{\text{погл}} = I_0 \cdot (1 - e^{-\mu z}) , \quad (18)$$

Кількість теплоти, поглиненої при випромінюванні, дорівнюватиме

$$Q_{\text{погл}} = I_{\text{погл}} \cdot z^2 \cdot t, \quad (19)$$

де  $t$  - час.

Кількість теплоти, що отримане від випромінювання СВД і перенесене через кубічний зразок крові можна визначити за законом Фур'є (теплопровідності):

$$Q_{\text{тепл}} = -\kappa \cdot dT / dx \cdot S \cdot t, \quad (20)$$

де  $dT/dx$  – перепад температур між гранями, віднесений до довжини куба (товщині шару);

$S$  - площа поверхонь куба;

$\kappa$  - коефіцієнт теплопровідності крові;

$t$  - час, за який відбувається процес теплопереносу;

знак мінус показує, що тепловий потік направлений в сторону зменшення температури.

Прирівнюючи обидва рівняння і перетворюючи їх можна отримати вираз для зв'язку градієнта температур і початкової або поглиненої інтенсивності від випромінювання світлодіодів.

$$dT / dx = I_{\text{погл}} / 6\kappa, \quad (21)$$

або

$$dT / dx = I_0 \cdot (1 - e^{-\mu z}) / 6\kappa, \quad (22)$$

Знаючи значення коефіцієнтів поглинання ( $\mu$ ) і теплопровідності крові ( $\kappa$ ) [153], а також величину початкової інтенсивності ( $I_0$ ) від випромінювання СВД, можна розрахувати температуру, на яку можна нагрівати наш зразок крові. Слід зазначити, що температура опромінення біооб'єкту повинна бути незначною, тобто термічний вплив має бути практично відсутнім. Тому, тут вирішували зворотну задачу: які максимальні значення початкової інтенсивності для випромінювання матриць певних СВД повинні бути, щоб зразок нагрівався не більше ніж на  $T = 1^\circ \text{K}$ .

Відомо, що для  $\lambda = 410 \text{ нм}$ ,  $\mu = 2000 \text{ см}^{-1}$ ; для  $\lambda = 532 \text{ нм}$ ,  $\mu = 190 \text{ см}^{-1}$ ;



для  $\lambda = 568$  нм,  $\mu = 200$  см<sup>-1</sup>; для  $\lambda = 640$  нм,  $\mu = 15,5$  см<sup>-1</sup> ( $\mu$  – коефіцієнт поглинання крові), [153]. Очевидно, що величина  $e^{-\mu z}$  у всіх випадках буде дуже мала і рівняння (22) постане у вигляді:

$$dT / dx = I_0 / 6\kappa, \quad (23)$$

звідси

$$I_0 = 6\kappa \cdot \frac{dT}{dx}, \quad (24)$$

Нами була розрахована величина початкової інтенсивності ( $I_0$ ) при нагріванні зразка на 0,1° К, 0,5° К, 1° К. (Коефіцієнт теплопровідності крові  $\kappa = 0,55$  Вт/м·К;  $dx = z = 1$  см).

Отримано, що при нагріванні на  $\Delta T = 1^\circ$  К,  $I_0 = 33$  мВт/см<sup>2</sup>; при нагріванні на  $\Delta T = 0,5^\circ$  К,  $I_0 = 16,5$  мВт/см<sup>2</sup>; при нагріванні на  $\Delta T = 0,1^\circ$  К,  $I_0 = 3,3$  мВт/см<sup>2</sup>, відповідно.

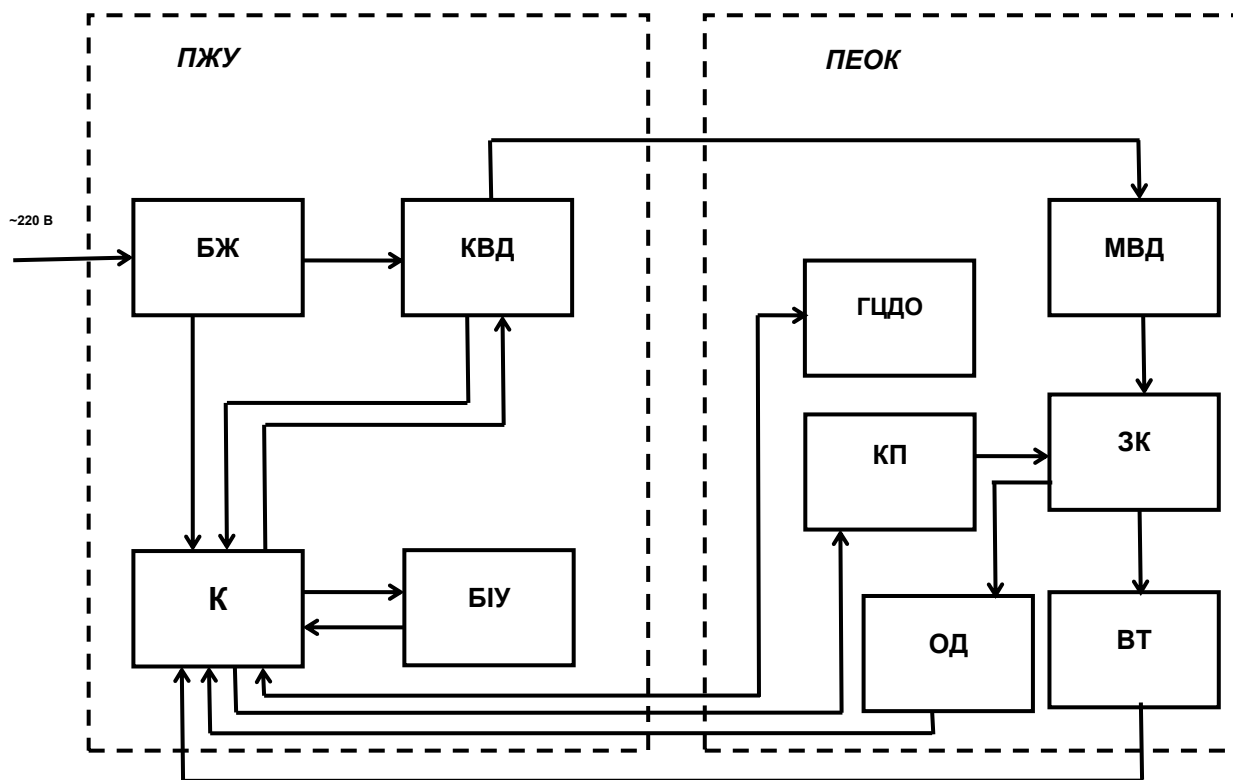
Отже, з отриманих результатів можна зробити висновок, що інтенсивність випромінювання СВД починаючи від ультрафіолетового діапазону довжин хвиль і вище не повинна перевищувати значення  $I_0 = 33$  мВт/см<sup>2</sup>.

При опроміненні зразка крові ЕМ хвилями оптичного діапазону і при часі експозиції - 15-30 хв., доза опромінення складає 29,7-59,4 Дж/см<sup>2</sup>.

Дані результати відповідають літературним даним для впливу низькоінтенсивним (дотепловим) опроміненням на біологічні об'єкти. Інтенсивність випромінювання впливу мікрохвиль не повинна перевищувати 10 мВт/см<sup>2</sup>, інтенсивність випромінювання впливу лазером не повинна перевищувати 20–25 мВт/см<sup>2</sup>.

### **Фототерапевтичне обладнання для екстракорпорального опромінення крові**

Фототерапевтичне обладнання для екстракорпорального опромінення крові складається з 2-х частин (див. рис. 8):



**Рисунок 8.** Схема обладнання

БЖ - блок живлення; КВД - комутатор випромінюючих діодів; К - контролер;  
 БІУ - блок індикації і управління; МВД - матриця випромінюючих діодів ( $\lambda_1$ ;  $\lambda_2$ ;  $\lambda_3$ );  
 ГЦДО - група цифрових датчиків освітленості; ЗК - зразок крові;  
 ВТ - вимірювач температури; ОД - оптичний датчик, система «захисту від бульбашок»,  
 КП - клапан, який перекриває потік крові; К - контролер

Перша частина пристрою для екстракорпорального опромінення крові (ПЕОК) складається з корпусу, в верхню кришку і дно якого вмонтовані матриці з випромінюючих діодів (МВД) різних діапазонів. Кожна матриця являє собою «мозаїку» з рівномірно розташованих випромінюючих діодів трьох видів: ультрафіолетового діапазону (310-320 нм), червоного кольору (630-640 нм), жовтого кольору (530-590 нм). Кількість, тип, щільність розташування випромінюючих діодів кожного виду в матриці підбирається, виходячи з необхідних параметрів сили струму і інтенсивності опромінення, див. матеріал, викладений вище. (Для ізотропності опромінення крові можна також розташувати випромінюючі діоди в бічних стінках корпусу).

У корпусі пристрою є ложе для кювети опромінення крові (ЗК), Передбачуваний розмір даного ложа 200 см<sup>2</sup> - виходячи з розмірів одноразових стерильних поліпропіленових контейнерів для забору та зберігання крові (250-

300 мВ). Оскільки максимальна інтенсивність опромінення крові не може бути більше  $33 \text{ мВт} / \text{см}^2$ , то, відповідно потужність (Р), що відповідає матриці ВД повинна бути порядку 6 Вт. Освітленість в корпусі вимірює група цифрових датчиків (ГЦДО), які впливаючи на контролер, не дозволяють збільшувати інтенсивність опромінення вище  $33 \text{ мВт} / \text{см}^2$  (для опромінення усім діапазоном довжин хвиль).

Температуру в кюветі передбачається фіксувати терморезистором, який має тепловий контакт з одноразовим поліпропіленовим контейнером з кров'ю. (Температура при опроміненні не повинна перевищувати  $1^\circ \text{C}$ ).

Щоб не допустити попадання бульбашок повітря при трансфузії крові, обладнання містить систему «захисту від бульбашок». Датчиком для цієї системи є оптичний датчик (ОД), оптичний канал якого перетинає шланг системи переливання крові. ОД виявляє бульбашки і подає сигнал контролеру (К), який в свою чергу управляє клапаном (КП), що встановлений на шлангу системи переливання крові. У разі виявлення бульбашок, контролер змушує клапан перекрити потік крові.

Друга частина обладнання складається з пристрою живлення і управління (ПЖУ), в результаті дії якого в матриці світлодіодів подається струм, що змінюються за обраним законом (вибір групи випромінюючих діодів певної довжини хвилі, регулювання потужності і експозиції, а також зміна даних параметрів в імпульсному режимі опромінення).

ПЖУ включає в себе: контролер (К), який здійснює управління режимом роботи всього пристрою; комутатор випромінюючих діодів (КВД), за допомогою якого здійснюється вибір відповідної групи ВД, а також регулювання (за допомогою ШІМ) потужності ВД в різних режимах. Для СВД як червоного, так і жовтого діапазону з величиною світлового потоку  $\Phi_v = 300 \text{ Лм}$ , при частоті ШІМ  $f = 1000 \text{ Гц}$ , тривалість імпульсів буде дорівнювати 9-11 мкс.

БІУ (блок індикації і управління) включає в себе РК (рідкокристалічний) дисплей і набір кнопок. На РК дисплей виводяться відомості про основні режими: характер роботи (безперервний або імпульсний); група випромінюючих

діодів; температура в приладі; час експозиції; потужність і тимчасові параметри при роботі в імпульсному режимі.

Набір кнопок дозволяє створювати всі зміни в режимах роботи пристрою.

На передній панелі виведені 3 індикатора (випромінюючі діоди жовтого, червоного і фіолетового кольорів), що підтверджують включення матриць відповідних ВД. Також на панелі розташований вимикач мережі живлення з індикатором.

БЖ (блок живлення) забезпечує необхідними напруженнями всі частини схеми і здійснює гальванічну розв'язку елементів пристрою від мережі.

Обладнання працює наступним чином.

Одноразовий стерильний поліпропіленовий контейнер для забору та зберігання крові, з антикоагулянтном, що там перебуває (підключений до системи переливання), з раніше зібраною кров'ю, поміщають в ложе для кювети опромінення крові. Закривають верхньою кришкою. За допомогою кнопок на РК дисплей виводиться програма (виконується за допомогою контролера) постійного або імпульсного режиму випромінювання матриць відповідних випромінюючих діодів певної довжини хвилі, часу експозиції, освітленості, потужності і т.д.

Після проведення опромінення (з певною експозицією) одноразового стерильного поліпропіленового контейнера для забору та зберігання крові, що знаходиться в ложі для кювети, за допомогою голки системи переливання крові пунктирують кровоносну судину, відкривається затиск системи переливання крові та проводиться трансфузія крові.

Тривалість процедури також задається за допомогою контролера (відповідними кнопками в відповідному пункті меню) і відображається на РК дисплеї.

## **Висновки**

Розроблено універсальне фототерапевтичне обладнання для екстракорпорального опромінення крові з 3-ма видами матриць

світловипромінювальних діодів різного діапазону ( $\lambda_1 = 310\text{--}320$  нм;  $\lambda_2 = 530\text{--}590$  нм;  $\lambda_3 = 640\text{--}650$  нм).

У процесі розробки були вирішені наступні завдання.

1. Визначено параметри впливу для забезпечення заданої дози, а також їх регулювання.

2. Визначено метод розрахунку параметрів матриць випромінювачів (фотонного поля), виходячи з наявних значень потужності діодів, кутів половинної яскравості і відстані від матриці світлодіодів до об'єкта (зразка крові).

3. Запропоновано метод розрахунку інтенсивності випромінювання СВД, на основі якого зроблено розрахунок величини інтенсивності і дози випромінювання (з різними експозиціями) для різних довжин хвиль, що впливають на зразок крові.

При опроміненні зразка крові ультрафіолетом ( $\lambda_1 = 310\text{--}320$  нм), діапазоном  $\lambda_2 = 530\text{--}590$  нм та діапазоном  $\lambda_3 = 630\text{--}640$  нм, інтенсивність випромінювання не може перевищувати значення  $I_0 = 33$  мВт/см<sup>2</sup>. Час експозиції  $t = 15\text{--}30$  хв., доза опромінення становить  $D = 29,7\text{--}59,4$  Дж/см<sup>2</sup>, відповідно.

4. Створена функціональна схема обладнання та алгоритм його роботи.

Розроблене фототерапевтичне обладнання для екстракорпорального опромінення крові відрізняється від прототипів не тільки тим, що замість УФ лампи або лазера застосовуються світлодіоди, а й тим, що є універсальним обладнанням, що працює на 3-х довжинах хвиль, які мають найбільшу ефективність при впливі на еритроцити людини.

Метод екстракорпорального опромінення крові, наряду з озонотерапією та плазмофорезом виступає в якості як профілактики, так і комплексного лікування від COVID-19, а також допомагає організму відновитися після перенесення цієї хвороби. Тому універсальна апаратура для екстракорпорального опромінення крові стає особливо актуальною в наш час. Запропонована апаратура, на відміну від прототипів, компактна, дешева, зручна в експлуатації.

## SECTION 5. ENERGY

DOI: 10.46299/ISG.2024.MONO.TECH.4.5.1

### **5.1 A system of models for the transformation of the coal industry of Ukraine, taking into account the priority of energy security criteria**

Протягом тривалого періоду часу світова практика реорганізації дотаційних вугільних підприємств у конкурентні була спрямована на виведення з експлуатації збиткових шахт. Наразі цей процес потребує особливої уваги в Україні з огляду на об'єктивно існуючу нестабільність структури вугільної паливної бази, зокрема через збройну агресію Російської Федерації, невизначеність попиту з боку галузей-споживачів вугільної продукції. Водночас, Україна не може дозволити собі повторити досвід інших країн через потребу в маневрених джерелах генерації електроенергії та широке традиційне використання вугільних технологій як в енергетиці, так і в інших секторах економіки.

При цьому потреба економіки в коксівному вугіллі покривається переважно за рахунок імпорту, а окремі його марки використовуються в мінімальних обсягах через скорочення внутрішньої паливної бази та дефіцит на світових ринках. Таким чином, через неможливість задоволення ключових потреб економіки у вугільній продукції всіх видів, ненадійність стану та можливостей джерел постачання, високу вартість утримання збиткових шахт, лише комплекс заходів з трансформації вуглевидобутку в Україні може забезпечити необхідні гарантії постачання стратегічно важливого енергоресурсу.

Проблема полягає [154] у визначенні доцільних рівнів таких різних трансформаційних заходів, як закриття вугледобувних підприємств, їх технологічне переоснащення, пошук нових джерел імпорту, заміщення вугільної продукції в галузях її споживання, заходи з переведення споживачів на інші види палива та енергії, а також визначення відповідної структури економіки в цілому в умовах її післявоєнної відбудови.

Таким чином, забезпеченням належного рівня енергетичної безпеки вимагає:

1) врахування попиту на вугільну продукцію, розмежованого за марками та технологічним призначенням, вже на етапі дослідження відповідної структури виробничих (видобувних) потужностей галузі;

2) запровадження методів багатофакторної оцінки вугледобувних підприємств як за виробничими показниками та показниками безпеки, так і за показниками ефективності, екологічної прийнятності, фінансового стану, гірничо-геологічних умов, соціальними критеріями тощо;

3) суттєвого підвищення продуктивності діючих шахт, зменшення витрат на їх утримання та обслуговування, безпечну експлуатацію за рахунок технологічного переоснащення гірничим обладнанням нового технологічного рівня (НТР);

4) визначення доцільних джерел постачання окремих марок коксівного вугілля за рахунок імпорту з урахуванням цін на світовому ринку вугілля, безпеки поставок та відповідності якісних показників вимогам до еталонного палива тощо;

5) поступового обмеження у використанні вугілля в економіці та соціальній сфері країни в цілому, що відповідає низьковуглецевому сценарію [155] розвитку енергетичного сектору країн.

У роботі [156] автори акцентують увагу на різноманітних моделях, створених останнім часом для вирішення проблеми інтеграції відновлюваних джерел енергії в енергетичні системи, і описують різні аспекти та наслідки такої інтеграції. Зокрема, це стосується використання енергетичних мереж у секторальному об'єднанні для покращення європейського енергетичного переходу, інтегрованих енергетичних систем в рамках локальних енергетичних ринків, розробки методології для аналізу взаємодії двох енергетичних систем.

У контексті широкого використання технологій відновлюваної енергетики [157] постає проблема визначення частки вугільної промисловості в економіці та енергетичному секторі.

Крім того, для успішної реалізації можливостей вугільної галузі, необхідне комплексне опрацювання наявних правових інструментів у контексті гармонізації українського законодавства із законами гірничодобувних галузей ЄС у процесі трансформації енергетики та післявоєнного відновлення. Встановлення тісної кореляційної залежності між можливостями гірничого виробництва та законодавством з охорони навколишнього середовища.

Враховуючи існування різних моделей вугільної промисловості [158-164], першочерговою проблемою при моделюванні видобутку вугілля наразі є взаємозв'язок цих моделей в нових умовах розвитку відновлюваних джерел енергії. Корисним у цьому плані є накопичений польський досвід використання тонких вугільних пластів. Аналіз досвіду впровадження підземних газогенераторів виявляє можливість отримання якісних енергохімічних продуктів на місці вугільних родовищ шляхом їх термохімічної переробки при збереженні екологічної та економічної складових процесу. Побічні продукти традиційного видобутку вугілля: відходи вуглевидобутку, відходи вуглезбагачення, зола і шлаки ТЕС і котелень, а також викиди шкідливих продуктів спалювання вугілля за рахунок впровадження технології підземної газифікації вугілля практично відсутні. Використання цього досвіду [165] може виявитися корисним для використання і на українських родовищах, що володіють пластами подібної потужності та глибиною залягання.

Вимушеним заходом при створенні представленої нами системи моделей був кризовий сучасний стан вугільної галузі в країні. Будучи однією з основ енергетичної, економічної та екологічної безпеки України [166] галузь стикається із загрозливими викликами.

Ситуація у вугільній галузі в останні роки ускладнюється військовими діями в Україні, а також зумовлена низкою економічних та технологічних факторів серед яких:

– складні гірничо-геологічні умови (мала потужність вугільних пластів (до 1,2 м), велика глибина розробки, значна газонасиченість і схильність багатьох пластів до раптових викидів вугілля і газу, низька якість вугілля);



- зростанням собівартості 1 тонни товарної продукції (у 2020 році фактична собівартість зростає у 3,4 рази порівняно з 2013 роком [167]);
- використання застарілих технологій та недостатнє технічне переоснащення виробництва; рівень зношеності основних фондів у галузі становить майже 60%; близько 96% шахт працюють без реконструкції понад 20 років; третина очисних вибоїв оснащена застарілим обладнанням, у тому числі відбійними молотками; низький рівень використання очисного видобутку (50%);
- низька якість (висока зольність) вітчизняної вугільної продукції, що призводить до її низької конкурентоспроможності на внутрішньому та зовнішньому ринках.

На підконтрольних уряду територіях Донбасу, а також у Дніпропетровській та Львівській областях функціонує близько 14 вуглезбагачувальних фабрик. Виробнича потужність фабрики, яка була встановлена при введенні її в експлуатацію (проектна потужність), неодноразово збільшувалася в процесі модернізації обладнання та вдосконалення технології збагачення вугілля і могла перевищувати початкову потужність у кілька разів.

Аналіз статистичних даних демонструє, що деякі шахти не доставляли видобуте вугілля на збагачувальні фабрики, а збагачували його на власних потужностях. Фактично, коефіцієнт завантаження потужностей збагачувальних фабрик є надто низьким, що вимагає докорінного вдосконалення структури збагачувального сектору вугільної промисловості.

У системі моделювання вугільної промисловості ці напрямки розвитку вуглевидобувних систем було представлено, зокрема, в моделях технологічного переоснащення та оптимізації виробничої структури галузі.

Вугільна галузь України наразі потребує як технологічного переоснащення окремих діючих вугледобувних підприємств, так і вирішення проблеми закриття низькорентабельних шахт, що в майбутньому може бути здійснено тільки в рамках очікуваних сценаріїв розвитку економіки країни в цілому. Для розробки таких сценаріїв комплексної системно-узгодженої реструктуризації вуглевидобутку в країні запропоновано та опробовано на тестових розрахунках

наступну структуру взаємопов'язаних математичних моделей дослідження і прогнозування вугільної галузі (рисунок 1).



**Рисунок 1.** Основні інформаційні зв'язки структури математичних моделей трансформації вугільної промисловості України

Свого часу Міністерство вугільної промисловості України розділило вугледобувні підприємства на групи відповідно до їхнього економічного та виробничого стану. У 2020 р. було розроблено проєкт концепції реформування вугільної галузі, який передбачав передачу частини шахт до ресурсної бази ПАТ «Центренерго» з подальшою приватизацією, частина з них мала приватизуватися окремо, а ті, що не знайшли приватного інвестора, – ліквідуватися. Такий поділ шахт ґрунтувався на техніко-економічних оцінках різних галузевих експертів і не мав формальних критеріїв.

Намагання оцінити різними інституціями рейтингові підходи за довгий період часу з 90-х років так і не досягли бажаного економічного ефекту. Перш за все це пов'язано з помилками у розподілі (або відсутності) інвестиційних коштів, закриті перспективних шахт, низьким рівнем технічного озброєння шахтного фонду тощо. У роботі [168] нами було запропоновано методику впорядкування

(ранжування) вугільних шахт за перспективністю діяльності через визначені техніко-економічні та фінансові показники.

Виходячи з пріоритету підвищення енергетичної безпеки країни, найважливішою метою реформування та розвитку вугільної галузі в сучасних умовах є збільшення обсягів видобутку вітчизняного вугілля при забезпеченні беззбиткової роботи галузі та її конкурентоспроможності на світових ринках вугільного палива.

Так, запропонована модель технологічного розвитку вуглевидобутку [169] пов'язує видобуток вугілля з обсягом шахтних викидів метану, необхідною виробничою потужністю обладнання для його утилізації та обсягом капітальних витрат на таке обладнання.

Структура та обсяги попиту на вугільну продукцію в першу чергу визначаються основними галузями-споживачами, якими в даному випадку виступають енергетика та металургія. Зокрема, представлено математичну модель забезпечення вугіллям теплової енергетики як галузі, що висуває вимоги до марочних та фізико-хімічних показників якості палива, що, в свою чергу, має суттєвий вплив на оцінку важливості вугледобувних підприємств, які виробляють дефіцитну для енергетики вугільну продукцію.

Проблема паливозабезпечення теплової енергетики країни вирішується нами в рамках багатопродуктової моделі виробничого типу, розробленої з метою визначення:

- обґрунтованих обсягів поставок палива, джерел його надходження від вітчизняних підприємств з урахуванням структурних змін у видобувних галузях, спричинених окупацією частини територій, а також за рахунок імпорту;

- варіантів функціонування та виробничої потужності теплових електростанцій на існуючих традиційних видах палива та з можливістю їх переобладнання на використання альтернативних видів палива;

- викидів основних забруднювачів довкілля для оцінки заходів з їх обмеження відповідно до вимог нормативних документів ЄС на основі критерію

сумарних витрат на видобуток і постачання всіх видів паливних продуктів, виробництво електроенергії та утилізацію забруднювачів довкілля.

В рамках вирішення однієї задачі визначення оптимальних обсягів та напрямів постачання вугілля в конкурентному середовищі авторами запропоновано балансово-оптимізаційну модель забезпечення країни вугільними ресурсами, яка враховує диференціацію вугільної продукції за марками та технологічним призначенням, а також можливість підвищення конкурентоспроможності галузі за рахунок модернізаційних та реконструктивних заходів. Модель являє собою економіко-математичну модель виробничого типу, цільовою функцією якої є вартість забезпечення вугіллям усіх марок за рахунок імпорту та джерел власного видобутку, яка, в свою чергу, може функціонувати в одному з двох станів – поточному, тобто без заходів з модернізації та реконструкції, та модернізованому, тобто з впровадженням таких заходів.

Аналіз функціонування системи забезпечення вугіллям об'єктів теплової генерації країни показав низький рівень ефективності окремих її ланок – видобутку, переробки та збагачення, постачання, а також недостатній рівень взаємодії та координації цих виробничих підсистем у забезпеченні споживачів готовою товарною вугільною продукцією з необхідними якісними показниками. Зокрема, висока зольність вугілля, що видобувається вітчизняними шахтами через використання застарілих технологій видобутку, вимагає високого ступеня очищення на збагачувальних фабриках, які, в свою чергу, також не в змозі забезпечити необхідні показники якості через низьку ефективність технологій збагачення.

Виконаний аналіз світових та вітчизняних методик прогнозування розвитку вугільної галузі дозволив визначити перелік моделей для формування структури системи математичних моделей трансформації вугільної галузі в контексті низьковуглецевого розвитку економіки країни, зокрема, моделі: оптимізації технологічного розвитку вугільної галузі; забезпечення країни

вугіллям за марками та технологічним призначенням з урахуванням вимог енергетичної безпеки.

Розроблена система математичних моделей буде використана для розв'язання різноманітних задач багатокритеріальної оптимізації виробничого стану вугільної галузі, зокрема: визначення обсягів видобутку та постачання вугільної продукції в економіку країни, формування прогнозної структури підприємств вугільної галузі при підготовці аналітичних матеріалів для центральних органів державної влади.

У напрямку створення методичного та програмного інструментарію для визначення оптимальної виробничої структури галузі, розроблено новий підхід до впорядкування (ранжування) підприємств вугільної галузі за комплексним критерієм їх перспективності, який, на відміну від відомих, використовує доступні широкому загалу об'ємні, технологічні, фінансово-економічні, безпекові, екологічні та соціальні фактори функціонування вугільної галузі країни, приведені до співставного вигляду. Це дозволило визначити рейтинги шахт та сформувати перелік перспективних вугледобувних підприємств з видобутку енергетичного та коксівного вугілля.

## SECTION 6. FOOD AND LIGHT INDUSTRY TECHNOLOGY

DOI: 10.46299/ISG.2024.MONO.TECH.4.6.1

### 6.1 Технологічні аспекти використання вівса у пивоварінні

Одним з основних завдань сучасного пивоваріння є пошук шляхів поліпшення якості пива, зниження його собівартості й розширення асортименту. Ці завдання можна вирішити завдяки розробленню технології нових сортів пива з використанням нетрадиційної сировини, що сприяє збагаченню пива корисними для організму людини речовинами.

Залежно від використовуваної сировини пиво поділяють на три категорії: пиво, приготовлене зі 100 % ячмінного солоду; пиво, приготовлене з використанням несолодженої сировини; пиво, приготовлене з використанням нетрадиційних видів сировини. У багатьох європейських країнах заміна до 40 % солоду несолодженими злаками дозволена законом і реалізується на практиці [170]. Серед традиційних і нетрадиційних зернових культур найбільш перспективне застосування має овес.

**Характеристика вівса.** У промисловості використовують півчастий (*Avena sativa*, *A. bisantina*, *A. abyssinica*, *A. strigoza*) і голозерний овес (*Avena sativa* L.). Особливістю голозерних форм вівса є відсутність жорстких квіткових плівок, міцно зв'язаних з поверхнею зернівки, що значно покращує його технологічні властивості. Плівки у голозерних форм м'які, не мають щільного зв'язку із зерном і практично повністю відокремлюються в процесі збирання зерна при його обмолоті, що сприяє скороченню технологічного процесу, зменшенню енергетичних витрат та збільшенню виходу готової продукції [171]. Овес півчастих сортів містить багато геміцелюлози й клітковини, що призводить до зниження виходу екстракту й підвищення грубої гіркоти пива.

Розподіл хімічних речовин за окремими складовими зерна вівса підпорядковується тим самим закономірностям, що й в інших злаках. Після

видалення плівок кількість целюлози в зерні істотно знижується, а відносний уміст крохмалю й жиру зростає [172].

Загальний вміст білка в зерні вівса відносно високий порівняно з іншими зерновими культурами й коливається від 7,4 до 24,5 % на суху речовину (табл.1) [173]. Білки вівса можна розділити на 4 основні групи: глобуліни (50-80 %), проламіни (4-15 %), альбуміни (1-12 %) і глютеліни (10 %).

Таблиця 1.

Хімічний склад зерна вівса та інших злаків

Види зернових культур	Вміст, % на суху речовину			
	білок	ліпіди	вуглеводи	харчові волокна
Овес півчастий (нелущений)	7,4-16,2	2,2-9,2	53-66	20-38
Овес півчастий (лущений)	10,5-24,5	3,1-15	62-75	7,8-12,2
Овес голозерний	14-19,5	8,3-11,4	69-72	8,6-12,1
Пшениця	13,5	2,3	67,7	12,1
Жито	10,2	2,0	63,9	16,1
Ячмінь півчастий (лущений)	12,0	2,4	65,9	15,4
Кукурудза	10,5	4,3	71,9	9,4

Для пшениці, жита, ячменю та кукурудзи наведено усереднені значення

Вівсяний білок має вищий амінокислотний коефіцієнт засвоюваності, ніж білок пшениці, але нижчий, ніж білок сої та гороху [172]. Амінокислотний склад зерна вівса сприятливіший порівняно з іншими злаками завдяки підвищеному вмісту незамінних амінокислот – лізину, метіоніну, треоніну, тирозину, лейцину, валіну, фенілаланіну. Білок вівса авенін не містить імуногенних послідовностей, присутніх у білку пшениці гліадіні, тому люди з целиакією можуть вживати продукти, вироблені з вівса.

Вміст жирів у зерні вівса досягає 2,2-11 % на суху речовину. Зерно вівса має здатність накопичувати більше ліпідів в ендоспермі порівняно з іншими злаками [172]. Ненасичені жирні кислоти складають 80 % усіх жирних кислот, присутніх у зерні вівса, серед яких  $\alpha$ -ліноленова (1-5 %), лінолева (24-48 %),

олеїнова (29-53 %), докозагексаєнова, ейкозапентаєнова та арахідонова кислоти є найбільш поширеними [172]. Серед насичених жирних кислот переважає пальмітинова кислота, що становить 21,4-22,7 % загальної кількості жирних кислот у вівсі.

Вміст крохмалю в зерні вівса нижчий порівняно з іншими злаками (табл. 1). Крім того, порівняно з іншими зерновими, вівсяний крохмаль має менший розмір зерен (гранул), вищий уміст амілози, високу в'язкість і водоутримувальну здатність. Завдяки цим характеристикам він широко використовується в харчових продуктах як загусник, гелеутворювач і засіб для покриття [172].

Розвиток продуктів харчування на основі вівса протягом останніх 30 років стимулювало зростання ринку функціональних продуктів харчування.

Зерно вівса є добрим джерелом харчових волокон, які важливі для підтримання правильного функціонування травної системи й організму в цілому [174]. Загальний вміст харчової клітковини в зерні вівса коливається від 1 до 30 % [172] і змінюється залежно від агрономічних умов, анатомічної будови зерна, товщини оболонки насіння й алейронового шару, товщини клітинних стінок ендосперму, ступеня здерев'яніння оболонки насіння та того, до пливчастих чи голозерних сортів належить овес. Зерна злаків, піддані лущенню та розмелюванню, втрачають значну кількість частин, багатих клітковиною. Співвідношення між розчинними і нерозчинними фракціями клітковини також змінюється.

Зерно вівса є надзвичайно цінним джерелом розчинної клітковини, особливо (1-3)(1-4)- $\beta$ -D-глюканів, вміст яких варіюється від 2 до 7,5 % [175]. Вівсяну камедь застосовують для зниження рівня холестерину в крові, ослаблення симптомів цукрового діабету, зниження артеріального тиску, профілактики серцево-судинних і онкологічних захворювань [175].

Зерно вівса є важливим джерелом багатьох мінералів, необхідних для здоров'я людини. Найважливіші макро- й мікроелементи, присутні в зерні вівса, охоплюють Ca, Mg, Fe, Mn, Cu, Zn, P і K [172]. Ca і Mn в зерні вівса здебільшого містяться в алейроновому шарі й ембріональному диску. P, K, Fe, Cu, Zn



накопичуються переважно в алейроновому шарі й зародку [172]. Зерна вівса багаті на вітаміни групи В: тіамін (вітамін В1), рибофлавін (вітамін В2), ніацин (вітамін В3) і пантотенову кислоту (вітамін В5) [172]. Крім того, овес містить вітамін Е, що має антиоксидантну функцію та допомагає захистити клітини від окисного пошкодження.

Зерно вівса також містить біологічно активні речовини, як-от фітостероли (ситостерол, кампестерол і стигмастерол), які здатні знижувати в крові рівень ліпопротеїнів низької щільності й зменшувати ймовірність розвитку атеросклерозу, лігнани (секоізоларициризини та матаірезинол), які виявляють протипухлинні й антиоксидантні властивості, а також авенантраміди – фенольні сполуки, які містяться виключно в зерні вівса та виявляють протизапальну, антиоксидантну та нейропротекторну дію [172].

Крім того, овес є джерелом речовин, які мають кардіопротекторні властивості, зокрема фолату, магнію, вітамінів В6 і Е [176]. Зернові продукти з вівса можна споживати хворим на целиакію.

### **Використання вівса як несолодженої сировини в пивоварінні.**

Основною сировиною в класичній технології пива є ячмінний солод, отримання якого потребує значних витрат. Замінюючи частину солоду несолодженою сировиною, виробники вирішують подвійне завдання. З одного боку, заміна частини солоду сприяє зменшенню виробничих витрат і підвищенню рентабельності виробництва, а з іншого – додавання несолоджених зернових культур зумовлює формування смакових нюансів напою. Останнім часом у пивоварінні як несолоджену сировину використовують переважно ячмінь або рис, рідше пшеницю чи кукурудзу.

Використання вівса як несолодженої сировини дуже обмежене. Овес здебільшого застосовують для виробництва спеціальних сортів пива, прикладом яких може бути вівсяний стаут. Однак його введення до рецептури пива розкриває широкі горизонти для створення нових оригінальних сортів напою, оскільки овес надає пиву унікальних органолептичних характеристик і може використовуватися для виробництва безглютенового пива [177].

При розробленні режиму затирання потрібно враховувати технологічні властивості вівса. Температурний інтервал клейстеризації крохмалю вівса дещо нижчий (56,2-61,7 °С) [170], ніж у несолодженого ячменю, тому при використанні вівса може бути застосовано настійний метод затирання. Оскільки овес має високий вміст  $\beta$ -глюканів, затирання потрібно розпочинати за температури 45 °С, що є оптимальною для дії ферменту енд- $\beta$ -глюканазі, наявного в ячмінному солоді. Гідромодуль затору має бути в межах 1:3-1:4. Враховуючи ці особливості, рекомендовано режим затирання солоду з додаванням несолодженого вівса настійним (інфузійним) способом з витримування температурних пауз, оптимальних для дії основних груп гідролітичних ферментів – цитолітичних, протеолітичних, амілолітичних ( $\alpha$ - і  $\beta$ -амілаз), який представлено на рис. 1а.

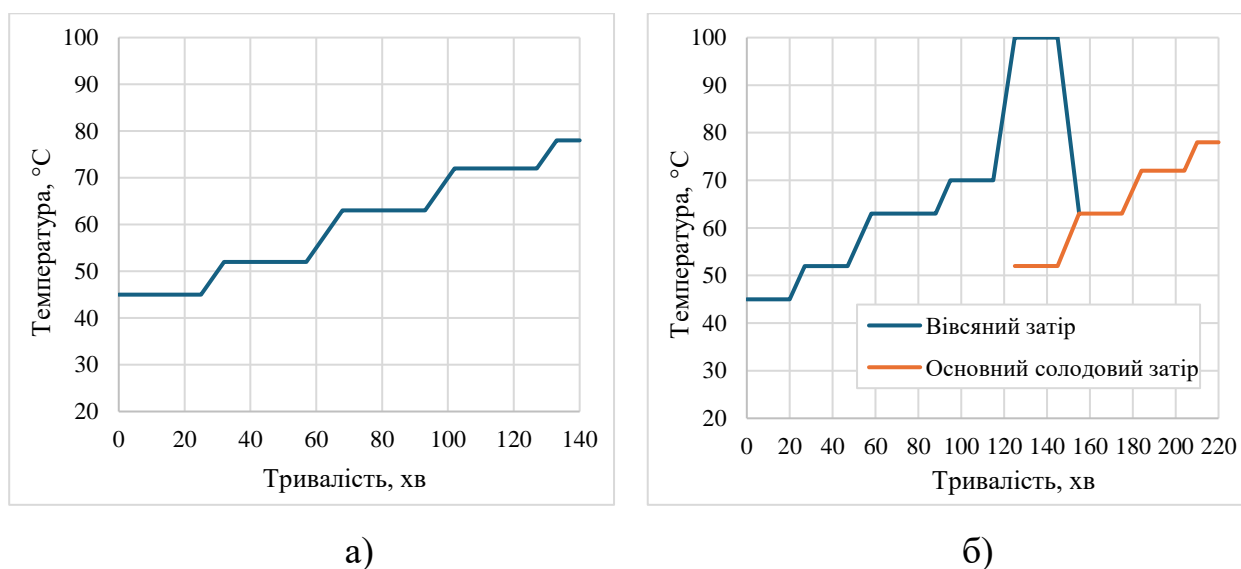


Рисунок 1. Режим затирання ячмінного солоду з додаванням несолодженого вівса: а) настійним способом; б) одновідварним способом

Ефективність процесу затирання визначається тривалістю оцукрювання крохмалю, тривалістю фільтрування затору та виходом екстракту. Зі збільшенням кількості вівса у засипі від 10 до 50 % подовжується тривалість оцукрювання крохмалю [178]. Це пов'язано з тим, що для несолодженого вівса характерні дуже низькі/незначні рівні цитолітичної, протеолітичної та амілолітичної активності

ферментів порівняно з ячмінним солодом, оскільки саме під час солододорощення активуються наявні гідролітичні ферменти й синтезуються нові [170].

Зі збільшенням кількості вівса у засипі від 10 до 50 % зменшується вихід екстракту [178]. Проте заміна 10-40 % ячмінного солоду голозерним вівсом не призводить до зміни рівня екстракту [170].

З метою підвищення виходу екстракту на 6-7 % рекомендовано застосування декокційного способу затирання. Розроблений з урахуванням технологічних властивостей вівса режим затирання одновідварним способом представлено на рис. 1б. Процес затирання вівсяного затору, приготовленого змішуванням усієї кількості подрібненого вівса та 1/3 кількості помелу ячмінного солоду за гідромодуля 1:3-1:4, розпочинають за температури 45 °С. Затір нагрівають з витриманням відповідних температурних пауз до кипіння та кип'ятять упродовж 20-30 хв. У момент початку кипіння вівсяного затору в другому заторному чані розпочинають затирання основної частини солоду за температури 52 °С, яку витримують 15-20 хв. Після цього змішують основний затір з відваром, унаслідок чого температура заторної маси встановлюється в межах 63-64 °С. Далі затирання ведуть відповідно до встановленого режиму (рис. 1б).

При збільшенні відсоткового відношення кількості вівса до засипу погіршується прозорість сусла, збільшується його в'язкість, утруднюється фільтрування. Для усунення цих недоліків при частці вівса у засипі 20 % і більше доцільне використання ферментних препаратів, дія яких спрямована на зниження в'язкості затору та збільшення виходу екстракту.

Сусло, отримане затиранням сировини, що складається із 40% вівса та 60% ячмінного солоду, має таке саме співвідношення між моно-, ди- та трисахаридами, як сусло, одержане при використанні 100 % ячмінного солоду.

При використанні несолодженого вівса отримують пиво з поліпшеними сенсорними властивостями. Смак і аромат такого пива є подібним, а в деяких випадках навіть кращим від пива, отриманого зі 100 % солоду [170]. Це пов'язано з тим, що вівсяне пиво містить у значно нижчих концентраціях 2-фурфурол та  $\gamma$ -

ноналактон (компоненти старіння), а також ацетальдегід, та має більший вміст естерів – етилацетату й ізоамілацетату [170]. При заміні 10 % солоду лущеним вівсом пиво має кращий смак і аромат від пива, отриманого з використанням несолоджененого ячменю.

**Використання вівсяного солоду в пивоварінні.** Вівсяний солод може використовуватися у рецептурі пива як сортоутворювальний компонент.

Особливістю вівсяного солоду є підвищений вміст у ньому  $\beta$ -глюкану. Попри те, що під час солододорощення кількість  $\beta$ -глюкану в зерні знижується внаслідок дії комплексу ферментів  $\beta$ -глюканази, активність яких зростає при пророщуванні злаків, вміст  $\beta$ -глюкану в солоді залишається досить високим. З огляду на це режим затирання вівсяного солоду повинен відрізнятися від режиму, який застосовують для ячмінного солоду.

Гідромодуль вівсяного затору через високу його в'язкість має становити 1:4. За температури затирання нижче 65 °C в'язкість затору зростає в багато разів. Це пов'язано з низькою температурою клейстеризації крохмалю вівса (55-60 °C) і недостатньою активністю ендо- $\beta$ - й екзо- $\beta$ -глюканази солоду. Тому затирання вівсяного солоду потрібно розпочинати за температури 65-67 °C, та для отримання високої концентрації мальтози витримувати затір за цієї температури щонайменше 60 хв. Тривалість оцукрювальної паузи за температури 72-73 °C через низьку активність  $\alpha$ -амілази солоду має становити не менш ніж 30 хв. Режим затирання вівсяного солоду, розроблений з урахуванням його технологічних властивостей, наведено на рис. 2.

Не виявлено жодного негативного впливу застосування вівсяного солоду в кількості 10 % від засипу на перебіг технологічного процесу та якість кінцевого продукту у виробництві пива верхового бродіння порівняно з використанням 100 % ячмінного солоду [179]. За вищого вмісту вівсяного солоду (50 і 100 %) подовжується тривалість фільтрування затору, зменшується кількість утвореного суслу та вміст у ньому екстракту, отримане пиво містить менше спирту й має більшу кольоровість [179]. З огляду на це виникає потреба використання екзогенних ферментів.

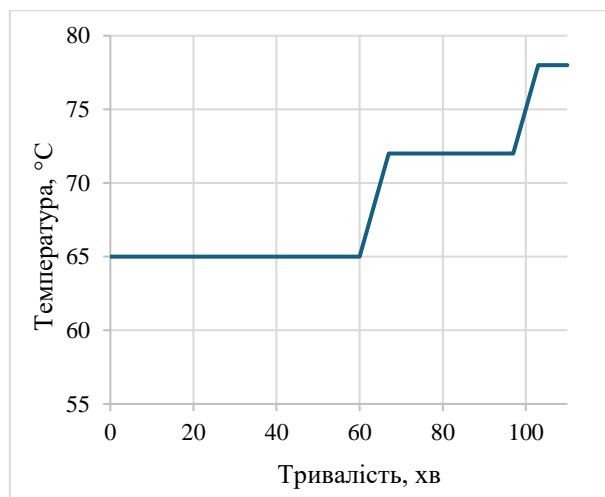


Рисунок 2. Режим затирання вівсяного солоду

Заміна ячмінного солоду вівсяним лише незначно впливає на вміст іонів, однак спричиняє, серед іншого, зниження рН, збільшення вмісту глюкози в суслі, а також підвищення кольоровості пива. Значних відмінностей у вмісті мальтози й мальтотріози між зразками пива немає. Процес бродіння сусла незалежно від частки вівсяного солоду перебігає без ускладнень [179].

Пиво, отримане зі 100 % вівсяного солоду, має ягідний смак і аромат. Як і пиво з додаванням несолодженого вівса, воно містить у значно менших кількостях 2-фурфурол,  $\gamma$ -ноналактон, ацетальдегід, та має більший вміст етилацетату й ізоамілацетату [177]. Ніжніший смак пива у разі поєднання вівсяного солоду та несолодженого вівса порівняно з пивом зі 100 % вівсяного солоду пов'язаний з нижчим рівнем естерів, вищих спиртів і етанолу та наявністю більш різноманітного профілю амінокислот [177].

Вівсяне пиво характеризується меншою стабільністю піни порівняно з пивом, отриманим з ячмінного солоду. Цю проблему можна розв'язати за допомогою стабілізаторів піни, зокрема препаратів, що містять пропіленглікольальгінат або пектин [180].

Останнім часом зростає зацікавлення споживачів безглютеновим пивом. Таке пиво виготовляється двома методами. Перший метод полягає у використанні класичної пивоварної сировини та видаленні глютену під час технологічного процесу, зокрема ферментативним шляхом. За такою технологією разом з

ячмінним солодом може перероблятися безглютенова несолоджена сировина, зокрема овес. Другий спосіб полягає у використанні безглютенового солоду, наприклад, виробленого з вівса. Безглютенове пиво, отримане зі 100 % вівсяного солоду, має цікавий смако-ароматичний профіль – смак, схожий на чорницю, малину або йогурт, та містить меншу кількість летких продуктів бродіння і карбонільних сполук, ніж ячмінне пиво [181].

**Висновки.** Зерно вівса є цінною та водночас недорогою сировиною, що може використовуватися в пивоварінні з метою заміни ячмінного солоду.

У роботі науково обґрунтовано режими затирання зернової сировини при заміні солоду несолодженим вівсом із застосуванням інфузійного й декокційного способів. Заміна ячмінного солоду вівсом у кількості до 20 % не потребує внесення змін до технологічного процесу, водночас отримують пиво з відмінним приємним смаковим тоном. При збільшенні частки несолодженої сировини до 40 % для забезпечення можливості виробництва пива доброї якості потрібне використання ферментних препаратів.

Також науково обґрунтовано режим затирання вівсяного солоду. Для збільшення виходу екстрактивних речовин і зменшення в'язкості затору доцільне перероблення грубого помелу солоду та використання ферментних препаратів. Пиво, приготовлене зі 100 % вівсяного солоду, має цікавий смако-ароматичний профіль – ягідний смак і аромат. Перспективним є використання вівсяного солоду для виробництва безглютенового пива.

## 6.2 Функціональні добавки для низькожирних майонезних соусів

Ринок майонезної продукції суттєво змінився за останні десятиліття. Має місце значне розширення асортименту за рахунок дієтичних, вегетаріанських, збагачених нутрієнтами майонезних соусів і виготовлення продуктів зі спеціальними смаковими та ароматичними добавками і наповнювачами. Серед рецептурних компонентів з'явилася велика кількість функціональних добавок (у тому числі і комплексної дії), що потребує їх систематизації, вивчення властивостей та взаємодії з іншими компонентами, а також дослідження питань їх впливу на якість та безпечність отримуваних продуктів.

На Українському ринку майонезна продукція представлена майонезами і майонезними соусами. Останні за Національним стандартом України «ДСТУ 4487:2015 Майонези та майонезні соуси. Загальні технічні умови» можуть містити незначну частку жиру на відміну від майонезів з вмістом жиру не менше 50% і обов'язковою присутністю в рецептурному складі яєчних продуктів у визначеній кількості. У законодавстві багатьох держав існують суворі вимоги, спрямовані на те, щоб споживач не був введений в оману назвою продукту. Наприклад, залежно від жирності, майонезний продукт може називатися майонезом за 80%-вої жирності, салатним майонезом за 70-50%-вої жирності, або салатним соусом (dressing) за 49-20%-вого вмісту жиру.

При суттєвому зниженні вмісту жиру в майонезному соусі вважається складним завданням імітувати реологічні ефекти жиру за допомогою систем, які його замінюють. Та з урахуванням широкого спектру використовуваних гідроколоїдів і модифікаторів текстури, спеціальних харчових Е-добавок, доступних в даний час, це завдання спрощується. Виготовлення майонезних соусів належної консистенції забезпечується додаванням спеціальних добавок – згущувачів та стабілізаторів. В якості таких використовують продукти як штучного походження, так і нативні або модифіковані (крохмалі, пектини та ін.) До рецептурного складу майонезів вводять такі харчові Е-добавки, як альгінат

натрію (E401), гуарова камедь (E412), ксантанова камедь (E415) та ін., а також їх суміші. Як згущувачі використовують і білкові ізоляти, отримувані з рослинної сировини (сої, квасолі, нуту) та різні види борошна. В якості функціональних компонентів до рецептури низькожирних майонезів додають різноманітні порошки, отримувані з овочів і фруктів.

Результати досліджень і публікацій останніх років підтверджують ефективність застосування борошна у виробництві низькожирних майонезів і майонезних соусів. В якості природних стабілізаторів у технології емульсійних продуктів пропонують використовувати вівсяне і перлове борошно. Горохове борошно доцільно вводити до рецептури майонезної продукції і в якості згущувача, і як додаткове джерело білка. Компонентами низькожирних дієтичних емульсійних продуктів є: рисове борошно, гарбузове і борошно поранг (Porang). Останнє, маловідоме нам борошно отримують з рослини *Amorphophallus muelleri*, яка в деяких районах Яви відома як *iles-iles*. Рецептурними складовими майонезів слугують такі види борошна, як арахісове, кунжутне і соєве. Розробники технології виготовлення низькокалорійних соусів пропонують до використання у їх складі борошна амаранту, зародків пшениці і аглютенowego борошна з черемхи. Висока здатність утримувати вологу притаманна кокосовому борошну, що робить його ефективним згущувачем низькокалорійних десертних майонезних продуктів.

Асортимент борошна надзвичайно широкий і ринок постійно поповнюється його новими видами. До загальних характеристик борошна відносять хімічний, гранулометричний склад та ін. Для борошна, як компонента емульсійних продуктів, особливо низькожирних, важливою технологічною характеристикою є вологоутримуюча здатність. Саме цей показник вказує на здатність до формування стійкої емульсії зі значною часткою водної фази із заданими реологічними характеристиками і потрібної консистенції.

Виконані дослідження різних видів борошна і визначено їх показники вологоутримуючої здатності. Найвищі значення даного показника мають: кокосове (492-509%), льняне (471-478%), кунжутне (420-440%) і гречане



борошно (350-357%), що робить можливим їх використання в рецептурах низькожирних емульсійних продуктів. Для порівняння, вологоутримуюча здатність соєвого борошна, яке найчастіше застосовують в якості загущувача, становить 350-410%. Найнижче значення вологоутримуючої здатності серед досліджуваних зразків у мигдального борошна (80-99%), що пояснюється високим вмістом жирів і низькою кількістю у його складі білків і харчових волокон. Вивчено можливість створення купажів борошна із прогнозованою величиною показника вологоутримуючої здатності (табл.1).

**Таблиця 1**

**Вологоутримуюча здатність купажів мигдального і кокосового борошна**

№ суміші	Склад суміші		Вологоутримуюча здатність, %
	Компонент суміші	Вміст, %	
1	2	3	4
1	Мигдальне борошно	100	89,5
	Кокосове борошно	0	
2	Мигдальне борошно	75	203,0
	Кокосове борошно	25	
3	Мигдальне борошно	50	334,5
	Кокосове борошно	50	
4	Мигдальне борошно	25	405,0
	Кокосове борошно	75	
5	Мигдальне борошно	0	500,5
	Кокосове борошно	100	

Як бачимо з наведених у таблиці результатів, збільшення у суміші мигдального і кокосового борошна кількості останнього до 25% дозволяє збільшити здатність утримувати вологу більш ніж у 2,5 рази; додавання його у кількості 50% – в 3,7 рази; а збільшення вмісту у купажі кокосового борошна до 75% збільшує показник вологоутримуючої здатності в 4,5 рази у порівнянні з даним показником для мигдального борошна.

Цікавими об'єктами для досліджень можуть слугувати індивідуальні зразки і суміші борошна з нетрадиційної сировини (кіноа, чіа, каштану та ін.), а також їх купажі з різними продуктами перероблення насіння, таких як: шрот, макуха, білкові ізоляти, висівки. Для досліджень обрано пшеничне борошно з невисоким показником вологоутримуючої здатності і пшеничні висівки, які є доступними і не високовартісними продуктами; визначено їх вологоутримуючу здатність, досліджено властивості їх сумішей (табл.2).

**Таблиця 2**

**Вологоутримуюча здатність пшеничного борошна, пшеничних висівок та їх сумішей**

№ суміші	Склад суміші		Вологоутримуюча здатність, %
	Компонент суміші	Вміст, %	
1	2	3	4
1	Пшеничне борошно	100	103,5
	Пшеничні висівки	0	
2	Пшеничне борошно	75	159,0
	Пшеничні висівки	25	
3	Пшеничне борошно	50	305,0
	Пшеничні висівки	50	
4	Пшеничне борошно	25	476,5
	Пшеничні висівки	75	
5	Пшеничне борошно	0	530,5
	Пшеничні висівки	100	

Як видно з табл. 2 додавання до пшеничного борошна висівок сприяє суттєвому збільшенню показника вологоутримуючої здатності. Регулюючи їх співвідношення в суміші можливо отримувати стабілізуючі системи із прогнозованою величиною вологоутримуючої здатності, що дозволить використання їх в рецептурах майонезів і салатних соусів різної жирності. До

того ж введення висівок дає можливість збагатити продукт харчовими волокнами та додатковими нутрієнтами.

Визначені показники вологоутримуючої здатності клітковини з різної сировини (розмір фракцій від 0,2 мм до 1,25 мм). Як видно з наведених у табл. 3 результатів, досліджувані зразки мають високий показник вологоутримуючої здатності і можуть використовуватися як ефективні згущувачі низькожирних емульсійних продуктів.

Визначено вологоутримуючу здатність макухи, борошна, подрібненого насіння і їх сумішей. В якості об'єктів дослідження використовували продукти перероблення льону, кунжуту і гарбузового насіння. Льняне, кунжутне й сухе гарбузове насіння перед дослідженням подрібнили і відокремили фракцію з розміром частинок до 0,5 мм. Вибір найменшої за розміром фракції пояснюється попередньо виконуваними дослідженнями щодо впливу розміру частинок на їхню вологоутримуючу здатність. До того ж використання як функціональної добавки до майонезів і майонезних соусів великих за розміром фракцій насіння мало б небажаний вплив на консистенцію одержуваного продукту. Вологоутримуючу здатність досліджуваних об'єктів визначали методом центрифугування, отримані результати наведені в табл. 4.

**Таблиця 3**

**Вологоутримуюча здатність різних видів клітковини**

№ зразка	Торгівельна назва	Склад	Вологоутримуюча здатність, %
1	Клітковина рослинна висівок гречки	Висівки гречані	423,2
2	Клітковина рослинна з насіння кунжуту	Жмих харчовий з насіння кунжуту	314,7
3	Клітковина рослинна з насіння розторопші	Жмих харчовий з насіння розторопші	559,8
4	Клітковина рослинна з насіння льону	Жмих харчовий з насіння льону	739,6

Продовження таблиці 3

5	Клітковина рослинна	Клітковина з оболонки насіння пшениці	450,7
6	Пектин яблучний в клітковині	Клітковина з оболонки насіння пшениці- 60%, яблучний порошок - 40%	401,7
7	Пектин гарбуза в клітковині	Клітковина з оболонки насіння пшениці - 60%, порошок гарбуза - 40 %	405,6

Таблиця 4

**Вологоутримуюча здатність (W, %) насіння, макухи й борошна льону, кунжуту та гарбуза**

Назва	W, %	Назва	W, %	Назва	W, %
Макуха харчова з насіння льону	806,2	Макуха харчова з насіння кунжуту	511,6	Пектин гарбуза в клітковині	389,1
Льняне борошно	479,0	Кунжутне борошно	430,0	Гарбузове борошно	273,5
Подрібнене насіння льону	255,5	Подрібнене насіння кунжуту	147,2	Подрібнене насіння гарбуза	104,7

Як видно з табл. 4, для групи продуктів з однієї сировини показник вологоутримуючої здатності найменший для подрібненого насіння. Пояснити це можна присутністю в його складі значної кількості жирів, тоді як борошно і макуха містять більшу кількість білків і вуглеводів. Присутність у насінні корисних нутрієнтів робить їх бажаними компонентами у складі комплексних функціональних добавок. Тому були досліджені трикомпонентні суміші з різним вмістом макухи, борошна і насіння (табл. 5).

**Таблиця 5**

**Вологоутримуюча здатність (W, %) комплексних функціональних добавок на основі продуктів перероблення льону, кунжуту і гарбуза**

Назва добавки	Вміст компонентів, %			(W, %)
	макуха*	борошно	насіння**	
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>
Льон 1	10	10	80	340,0
Льон 2	20	20	60	446,3
Льон 3	30	30	40	520,0
Льон 4	40	40	20	614,9
Кунжут 1	10	10	80	229,5
Кунжут 2	20	20	60	276,2
Кунжут 3	30	30	40	357,5
Кунжут 4	40	40	20	378,3
Гарбуз 1	10	10	80	182,8
Гарбуз 2	20	20	60	255,0
Гарбуз 3	30	30	40	308,5
Гарбуз 4	40	40	20	413,2

\* пектин гарбуза в клітковині для комплексних добавок на основі гарбуза

\*\* фракція подрібненого насіння з розмірами частинок менше ніж 0,5 мм

З отриманих результатів, наведених у табл. 5, можемо зробити висновок, що збільшення у складі комплексної функціональної добавки компонентів з високим показником вологоутримуючої здатності прогнозовано сприяє збільшенню цього показника і для суміші.

Серед гідроколоїдів, що застосовуються у виробництві низькожирних майонезних продуктів, особливе місце займають харчові волокна цитрусових з високим показником вологоутримуючої здатності, більшим ніж у волокон з моркви і вівса. Порошкові продукти з апельсинової м'якоті зі збалансованим вмістом розчинних і нерозчинних харчових волокон слугують ефективними добавками в емульсійні продукти з низькою часткою жиру. Описані властивості

апелсинових волокон, поверхнева активність яких обумовлена присутніми пектинами (~35%), білками (~8%) і целюлозою (>45%), що пояснює їх загущувальну дію.

Виконані дослідження властивостей порошку зі шкірки грейпфруту та його сумішей з іншими функціональними добавками для низькожирних майонезних соусів.

Для досліджень використовували висушену природнім шляхом шкірку червоного грейпфруту з вмістом води 8-9%. Її подрібнили і просіюванням через сита з отворами різного діаметру розділили на фракції. Для кожної фракції визначили насипну густину вимірюванням маси певного об'єму порошку і показник вологоутримуючої здатності методом центрифугування. Результати досліджень наведені в табл. 6.

**Таблиця 6**

**Вологоутримуюча здатність подрібненої шкірки грейпфруту**

Розмір фракції, мм	Насипна густина, кг/м <sup>3</sup>	Вологоутримуюча здатність, %
менше 0,50	204	808
0,50-0,65	272	750
0,65-0,80	343	708

Як видно з наведених в табл.6 результатів, досліджені зразки мають високий показник вологоутримуючої здатності. Можна зробити висновок, що їх доцільно використовувати як загущувачі низькожирних майонезних соусів з великою часткою води. Зменшення розмірів досліджуваної фракції супроводжується збільшенням показника вологоутримуючої здатності. Ця залежність вказує на доцільність використання в якості ефективного загущувача саме фракції з частинками найменшого розміру. До того ж її використання не призведе до появи такого дефекту як неоднорідність текстури майонезного соусу, що можливо при використанні фракцій більшого розміру. Високий показник вологоутримуючої здатності дозволить використовувати найдрібнішу фракцію шкірки грейпфруту

у незначних кількостях, що з точки зору органолептичних характеристик забезпечить виготовлення продукту з м'яким смаком і незначною гірчинкою.

Аналогічні дослідження виконали і для фракцій, отриманих з висушених апельсинових шкірок (табл.7).

Високі показники вологоутримуючої здатності зразків апельсину і грейпфруту можна пояснити значним вмістом харчових волокон (~60г/100г шкірки). Специфічністю харчових волокон цитрусових є велика кількість присутнього протопектину (24,0 % – 28,7 %), що зумовлює їх значні сорбційні властивості.

**Таблиця 7**

**Вологоутримуюча здатність подрібненої шкірки апельсину**

Розмір фракції, мм	Насипна густина, кг/м <sup>3</sup>	Вологоутримуюча здатність, %
менше 0,50	271	591
0,50-0,65	329	581
0,65-0,80	444	563

Для подальших досліджень обрали найдрібніші фракції (менше 0,50 мм) подрібненої шкірки грейпфруту (грейпфрутовий порошок) і подрібненої шкірки апельсину (апельсиновий порошок). Визначили показник вологоутримуючої здатності сумішей грейпфрутового і апельсинового порошоків, взятих у різних співвідношеннях. Результати досліджень наведені в табл.8.

**Таблиця 8**

**Вологоутримуюча здатність (W, %) суміші грейпфрутового і апельсинового порошоків**

Склад суміші		(W, %)
Компонент суміші	Вміст, %	
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>
Грейпфрутовий порошок	100	808
Апельсиновий порошок	0	

**Продовження таблиці 8**

<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>
Грейпфрутовий порошок	75	715
Апельсиновий порошок	25	
Грейпфрутовий порошок	50	634
Апельсиновий порошок	50	
Грейпфрутовий порошок	25	611
Апельсиновий порошок	75	
Грейпфрутовий порошок	0	591
Апельсиновий порошок	100	

Як видно з табл. 8 досліджувані суміші дещо відрізняються за показником вологоутримуючої здатності, але при цьому значення його досить високі. Збільшення в суміші частки грейпфрутового порошку з 25% до 75% підвищує вологоутримуючу здатність на 17%.

Оскільки притаманний для грейпфрутового і апельсинового порошоків помаранчевий колір різної інтенсивності може бути небажаним при виготовленні білих майонезних соусів, пропонуємо додавати біле кокосове борошно, що також характеризується високим показником вологоутримуючої здатності і є ефективним згущувачем. Дослідження виконані з цитрусовим порошком (суміш 50% грейпфрутового і 50% апельсинового порошку), змішаним з кокосовим борошном у різних співвідношеннях. Результати наведені в табл. 9.



Таблиця 9

**Вологоутримуюча здатність (W, %) суміші цитрусового порошка з кокосовим борошном**

Склад суміші		(W, %)
Компонент суміші	Вміст, %	
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>
Цитрусовий порошок	100	699
Кокосове борошно	0	
Цитрусовий порошок	75	657
Кокосове борошно	25	
Цитрусовий порошок	50	608
Кокосове борошно	50	
Цитрусовий порошок	25	585
Кокосове борошно	75	
Цитрусовий порошок	0	500
Кокосове борошно	100	

Як видно з табл. 9 додавання кокосового борошна дещо зменшує здатність суміші утримувати воду, та все ж залишається на високому рівні. При цьому використання таких композицій дозволить регулювати органолептичні властивості кінцевого продукту як за кольором, так і за смаковими якостями.

Екологізація виробництв, впровадження безвідходних технологій і пошук шляхів використання утворюваних в технологічному процесі відходів, як вторинних сировинних ресурсів, сприяють інтенсифікації їх дослідження. Наприклад, в шкірці гранату, побічного продукту його перероблення, міститься до 10% пектину. Шкірка маракуї багата на клітковину, яка виявляє гідроколоїдні властивості. Стабілізуючу дію у низькожирних майонезних соусах виявляють функціональні добавки, отримувані зі шкірок винограду, банана та кавуна.

## SECTION 7. GEODESY

DOI: 10.46299/ISG.2024.MONO.TECH.4.7.1

### **7.1 Особливості впорядкування та перспективи розвитку території довкілля атомних електричних станцій**

Атомні електричні станції (АЕС) є великими техногенними об'єктами, які значним чином впливають на регіональне планування та розвиток територій навколо себе. Будівництво та експлуатація таких об'єктів, в силу підвищеного ризику, ставить на порядок вищі вимоги до організації та розвитку їх територій, шляхом врахування великої кількості факторів. Складність вирішення цих прерогатив пов'язана з наявністю на території України п'яти атомних електричних станцій [201]: Запорізька АЕС, Південноукраїнська АЕС, Рівненська АЕС, Хмельницька АЕС та Чорнобильська АЕС (з 1 січня 2001 року виведена з експлуатації).

Розвиток країни та стабільність її економіки можливі лише за умов надійного забезпечення енергетичних потреб промислових комплексів та населення [202]. Згідно прогнозів МАГАТЕ [203] до 2050 року головними джерелами енергопостачання стануть атомні електричні станції) та поновлювальні джерела енергії (статистичні дані British Petroleum [204, 205]). Усього в світі нараховується 449 ядерних енергоблоків, діючих станом на січень 2024 року – 413 [206].

Атомна галузь відіграє значну роль в економіці України. В 2021 році атомні електростанції генерували 55,2 % від загальної кількості електроенергії в державі. Частка АЕС в енергетичній промисловості України становить понад 24 % [207]. За кількістю діючих ядерних реакторів та їх сумарною потужністю Україна посідає сьоме місце у світі та п'яте в Європі [208].

Управління ядерною галуззю в Україні забезпечує Державна інспекція ядерного регулювання України [209]. Крім цього у 1996 році засновано Державне підприємство «Національна атомна енергогенеруюча компанія «Енергоатом» з метою поліпшення енергозабезпечення виробництва та

населення, підвищення якості діяльності АЕС, забезпечення їх конкурентоспроможності в умовах енергетичного ринку.

Радіаційна безпека та робота атомних електростанцій регулюється чинним законодавством України, метою якого є визначення основних вимог до охорони здоров'я людини від можливої шкоди, пов'язаної із опроміненням джерелами іонізуючого випромінювання, вимог до безпечної експлуатації АЕС, а також до охорони навколишнього природного середовища [210-215].

Законодавча та нормативно-правова база в сфері ядерної енергетики достатньо розвинена та створює високий рівень правового регулювання суспільних відносин у галузі. Проте абсолютно не зачіпає питання організації раціонального використання і моніторингу земель, оцінки та прогнозу екологічного стану територій довкілля атомних електричних станцій, які зазнають постійного радіаційного впливу, їх захисту від забруднень та охорони. Частина законодавчо-нормативних документів, щодо усунення негативних наслідків Чорнобильської катастрофи та для попередження їх у майбутньому, прийнята більше 20-ти років тому [216-220]. Важливим та актуальним питанням є оновлення законодавчої та нормативно-правової баз з врахуванням нових наукових досліджень. В роботі вище зазначені питання більш детально будуть розглянуті на прикладі Хмельницької АЕС.

На території України електроенергію виробляють 15 атомних енергоблоків типу ВВЕР (водо-водяні енергетичні реактори) загальною встановленою потужністю 13835 МВт [201].

Запорізька АЕС є найбільшою атомною електростанцією не лише в Україні (шість енергоблоків), а й у Європі. ЗАЕС споруджена в регіоні, де за останні 50 років відбулися суттєві антропогенні зміни (створення водосховища на річці Дніпро, спорудження теплоелектростанції, будівництво міста Енергодар і атомної електричної станції) [221].

Запорізька АЕС є джерелом тепла промислового майданчика, м. Енергодар та інших споживачів довкола. В результаті виробничого процесу відбуваються

викиди тепла в атмосферу. Внаслідок цього простежується зміна мікроклімату довкілля.

Рівненська АЕС – перша електростанція в Україні оснащена реакторними установками типу ВВЕР (чотири енергоблоки). Результатом діяльності АЕС є вироблене тепло та електроенергія.

Місце розташування РАЕС обумовлене низькою родючістю ґрунтів та віддаленістю густозаселених територій. Вибір промислового майданчика для будівництва АЕС виявився помилковим через наявність на його території суфозійно-карстових утворень. Це призводить до осідання розташованих на ньому будівель і споруд [222].

Хмельницька АЕС проектувалася як станція із чотирма енергоблоками. Зараз на ХАЕС експлуатується лише два енергоблоки. Починаючи з 2008 року ведуться підготовчі роботи для будівництва енергоблоків №3 та 4 [223].

Територіально більшу частину зони впливу Хмельницької АЕС займає Рівненська область (частина Рівненського району: землі колишніх Острозького, Гощанського та Здолбунівського районів) та Хмельницька область (частина Шепетівського району: землі колишніх Славутського, Ізяславського, Білогірського та Шепетівського районів).

Південноукраїнська АЕС (три енергоблоки) – є основою Південноукраїнського енергетичного комплексу, який об'єднує Південноукраїнську АЕС, Олександрівську гідроелектростанцію і Ташлицьку гідроакумулюючу електростанцію – єдиного в Україні підприємства з комплексним використанням базових ядерних і маневрених гідроакумулюючих потужностей та водних ресурсів ріки Південний Буг [224].

До аварії на Чорнобильській АЕС працювало чотири енергоблоки типу РБМК-1000. 26 квітня 1986 року сталася екологічно-соціальна Чорнобильська катастрофа, спричинена вибухом і подальшим руйнуванням четвертого енергоблоку ЧАЕС. Катастрофа вважається найбільшою у світі за всю історію ядерної енергетики [225, 226].

Під впливом світової громадськості та взятих на себе зобов'язань, у 2000-му році владою України було прийнято остаточне рішення про виведення із експлуатації Чорнобильської АЕС. У квітні 2001 року ЧАЕС реорганізована в Державне спеціалізоване підприємство «Чорнобильська АЕС» (ДСП ЧАЕС), а у 2005 передана в сферу управління МНС України [226].

Контроль за діяльністю АЕС здійснюють Державна інспекція ядерного регулювання, Міністерство охорони здоров'я, Міністерство енергетики та захисту довкілля, Служба безпеки України, Державний нагляд за охороною праці, Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів, а також громадськість і спеціалісти МАГАТЕ.

Згідно технології виробництва електричної та теплової енергії на АЕС до переліку основних джерел впливу на навколишнє середовище відносять:

- а) джерела радіаційного впливу;
- б) джерела нерадіаційного впливу (хімічного та фізичного);
- в) джерела опосередкованого впливу.

Основними видами радіаційного впливу на навколишнє середовище, в результаті виробничого циклу АЕС, є:

- газоподібні радіоактивні викиди до атмосфери;
- скиди радіоактивних речовин до відкритих водойм;
- тверді радіоактивні відходи;
- рідкі радіоактивні відходи [227, 228].

Експлуатація АЕС є частиною ядерного паливного циклу, який розпочинається з видобутку та збагачення уранової руди. Наступним етапом вважається виробництво ядерного палива. Відпрацьоване на АЕС ядерне паливо піддають вторинній обробці з метою вилучення залишків урану та плутонію. Закінчується цикл, як правило, локалізацією і захороненням радіоактивних відходів. На кожній стадії ядерного паливного циклу у довкілля потрапляють радіоактивні речовини. Доза радіоактивного забруднення території від ядерних реакторів найбільше залежить від режиму їх експлуатації, відстані від них і переважаючого напрямку вітру в районі атомної електростанції [229].

Це стосується лише нормально функціонуючих атомних електростанцій. Однак навіть під час безаварійної роботи експлуатація реакторів неодмінно супроводжується викидами у довкілля радіонуклідів, які входять до продуктів розпаду урану та торію. До довго живучих радіонуклідів, утворених під час експлуатації АЕС, належать  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{14}\text{C}$ ,  $^3\text{H}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$  та інші [230]. Внаслідок цього радіаційний фактор є основним у визначенні потенційної небезпеки для населення, яке проживає на прилеглих до АЕС територіях.

Проте території навколо АЕС піддаються не тільки постійному радіаційному впливу, а й демографічному, промислового, сільськогосподарському і транспортному навантаженню.

Навколо підприємств I категорії (до яких відносять також АЕС) встановлюють санітарно-захисну зону (СЗЗ) та зону спостережень (ЗС). Необхідність встановлення цих зон визначається ступенем радіаційної небезпеки підприємства для населення.

Санітарно-захисна зона – це територія навколо радіаційно-ядерного об'єкта, де рівень опромінення людей в умовах нормальної експлуатації може перевищити квоту ліміту дози для категорії В. У СЗЗ атомних електростанцій забороняється розташування житлових будинків, адміністративних споруд, дитячих і лікувально-оздоровчих закладів, об'єктів водопостачання, промислових та допоміжних споруд, що не належать АЕС.

У СЗЗ забороняється проживання населення, встановлюються обмеження на виробничу діяльність, що не має відношення до радіаційно-ядерного об'єкта, та проводиться радіаційний контроль [211, 214, 217].

Під час виділення СЗЗ необхідно враховувати своєрідність метеорологічних і гідрологічних факторів у даній місцевості, а також перспективне збільшення потужності виробництва. У санітарно-захисній зоні та зоні спостережень АЕС здійснюється радіаційний контроль силами служби радіаційної безпеки підприємства відповідно до відомчого інструктивно-технічного документа, узгодженого територіальними закладами державної санітарно-епідеміологічної служби МОЗ України. Можливість використання земель і водойм, розташованих

у СЗЗ, з народногосподарською метою визначається тільки за узгодженням із адміністрацією підприємства і державною санітарно-епідеміологічною службою МОЗ України за умови обов'язкового радіологічного контролю продукції, що виробляється.

Зона спостереження – територія, на якій можливий радіаційний вплив ядерної установки та об'єктів, призначених для поводження із радіоактивними відходами, на населення, що проживає в цій зоні. Розміри та межі зазначених зон визначаються у проекті згідно з нормами, правилами та стандартами у сфері використання ядерної енергії, узгоджуються з органами державного регулювання ядерної і радіаційної безпеки та затверджуються місцевими виконавчими органами [211-215, 217, 218].

Для діючих АЕС, розташованих на території України, визначено санітарно-захисну зону та зону спостереження. Санітарно-захисна зона складає територію у радіусі 2,7 км для Хмельницької АЕС, 2,5 км для Рівненської АЕС, 3,0 км для Запорізької АЕС та 2,5 км для Південноукраїнської АЕС. Зона спостереження для всіх АЕС має радіус 30 км [228]. Для Чорнобильської АЕС встановлено 30-кілометрову зону відчуження [218].

Радіаційна небезпека санітарно-захисної зони та зони спостереження АЕС для прилеглих територій визначається в першу чергу міграційними процесами радіонуклідів у різних компонентах навколишнього середовища, а саме:

- ґрунтах;
- поверхневих та підземних водах;
- атмосфері;
- через біоту.

Хімічний вплив АЕС на атмосферу, водне середовище та ґрунт спричиняють хімічні елементи, що входять до складу її викидів та скидів. Це може бути як результат випаровування хімічних речовин, викидів газів від парових котлів, викидів хімічних речовин при роботі систем вентиляції/зрошення, так і внаслідок газоподібних викидів в атмосферу, що здійснюються через вентиляційну систему та димові труби. Основними шкідливими складниками викидів у

атмосферу, що потребують обов'язкового проведення постійного моніторингу є: окис вуглецю, пил, діоксид сірки, діоксид азоту.

Підземні та поверхневі води зазнають хімічного впливу в результаті скидів очищених стічних вод, випадкових виливів, скидів вод із охолоджувальних ставків до поверхневих водойм або проникнення у ґрунти, перенесення хімічних елементів із дощовою водою. Виробничі та господарсько-побутові води обов'язково очищуються та проходять відповідну обробку.

Хімічний вплив на ґрунт здійснюється внаслідок осідання хімічних елементів і їх сполук із атмосфери, випадкових виливів і проникнення хімічних елементів, перенесених дощовою водою [227, 229].

Фізичний вплив діючих енергоблоків на навколишнє середовище відбувається у вигляді теплової дії систем охолодження технологічного обладнання АЕС (лише третина теплової енергії перетворюється на електричну); збільшення вологості за рахунок випаровування води в атмосферу з бризкальних басейнів та ставків-охолоджувачів; впливу електромагнітного поля ліній електропередачі 330/750 кВ та всередині АЕС; шуму при роботі обладнання; впливу вібрації (тільки в межах виробничих приміщень) [228].

У зв'язку із тим, що зони спостереження АЕС насичені високовольтними лініями електропередачі (ЛЕП), які створюють потужні електромагнітні поля, розглянемо їх вплив на території довкілля більш детально.

ЛЕП складаються з великої кількості опор, розташованих рівномірно через 400-500 м із приєднаними до них ізоляторами та провідниками. Кожна з опор потребує земельну ділянку від 140 до 620 м<sup>2</sup> в залежності від типу опори. При експлуатації електричних установок (відкритих розподільчих пристроїв і повітряних ЛЕП) у просторі навколо їх струмоведучих частин виникає електромагнітне поле. Необхідно відзначити, що в електроустановках напругою нижче 330 кВ виникають менш інтенсивні електромагнітні поля, які не викликають негативного впливу на довкілля. Чим напруга вище – тим більше зона електричного поля, яка залишається незмінною протягом всього часу роботи ЛЕП. Біологічний вплив полів різних діапазонів неоднаковий.



Для захисту здоров'я населення від електромагнітного випромінювання ЛЕП змінного струму промислової частоти встановлено санітарно-захисні (охоронні) зони. Санітарно-захисною зоною ЛЕП вважається територія на якій напруженість електричного поля перевищує 1 кВ/м. У ненаселеній місцевості (незабудована територія, яку відвідують люди, доступна для транспорту та сільськогосподарські угіддя) значення напруженості граничнодопустимого рівня (ГДР) електричного поля становить 15 кВ/м. Напруженість електричного поля визначається на висоті 1,8 м від рівня землі.

СЗЗ для ЛЕП встановлюється у вигляді земельної ділянки, межі якої регламентуються з обох сторін від неї на певній відстані від проекції крайніх фазних проводів на землю, в перпендикулярному до повітряної лінії напрямку [231]:

- 20 м для ЛЕП напругою 300 кВ;
- 30 м для ЛЕП напругою 500 кВ;
- 40 м для ЛЕП напругою 750 кВ;
- 55 м для ЛЕП напругою 1150 кВ.

Сільськогосподарські угіддя, що знаходяться в СЗЗ ЛЕП, рекомендується використовувати під вирощування сільськогосподарських культур, які не потребують ручного обробітку.

Під керівництвом НЕК «Укренерго» були проведені роботи з вимірювання електромагнітного поля ЛЕП 750 кВ, яке показало, що на відстані 40 м від опори, напруженість поля становить менше, ніж 5 кВ/м [232].

Для прикладу на рис. 1 показано розподіл електричного поля під проводами ЛЕП 750 кВ при мінімальних відстанях між опорами 435 м та від проводів до землі 12 м. На відстані 18 м від осі ЛЕП, тобто безпосередньо під проводами та при їх найбільшому провисанні, напруженість електромагнітного поля становить 10-15 кВ/м.

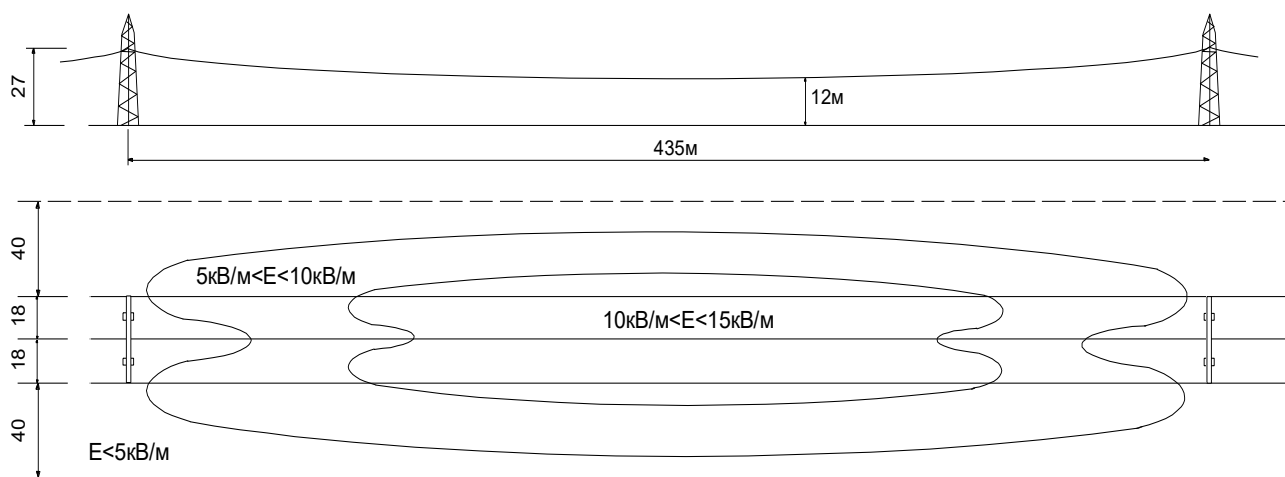


Рисунок 1. Санітарно-захисна зона ЛЕП 750 кВ [232].

Пунктирною лінією позначена межа санітарно-захисної зони ЛЕП, яка є 40 м від крайнього проводу з обох сторін траси ЛЕП. В санітарно-захисній зоні лінії електропередачі напруженість електромагнітного поля перебуває в межах від 5 до 10 кВ/м.

Згідно законодавства України в межах СЗЗ ЛЕП забороняється: розміщення житлових та інших суспільних будівель, підприємств із обслуговування автомобілів, створення постійних стоянок транспорту, прокладання нафто – та газопроводів [231].

Зони спостереження АЕС насичені високовольтними лініями електропередачі, які створюють потужні електромагнітні поля та займають значні території різного цільового призначення. Тому дослідження міграції радіонуклідів в ґрунтах як у звичайних умовах, так і під впливом електромагнітного поля ЛЕП високої напруги, є надзвичайно необхідним та актуальним питанням.

Виробнича діяльність людства призвела до надходження в біосферу штучних радіонуклідів, яких нараховується більше 80 (регламентні скиди та викиди підприємств ядерно-паливного циклу, випробування ядерної зброї тощо). За період розвитку ядерних та радіаційно небезпечних технологій ставалися аварії різного ступеня складності, з різними наслідками для населення і довкілля та різною за обсягами кількістю радіонуклідів, що потрапили в біосферу.

До 2011 року найбільшою аварією, що супроводжувалась радіоактивним забрудненням навколишнього середовища, була катастрофа на Чорнобильській АЕС. В результаті аварії на Чорнобильській атомній електростанції у навколишнє середовище було викинуто величезну кількість радіонуклідів із сумарною активністю приблизно 90 МКі, до складу яких у значній кількості входять аналоги біогенних елементів – калію та кальцію –  $^{137}\text{Cs}$  та  $^{90}\text{Sr}$ . Це призвело до забруднення 53,5 тис. км<sup>2</sup> території України [233]. Були вилучені з господарського використання 130,6 тисяч гектарів сільськогосподарських угідь, що потребують реабілітації та повернення у виробництво.

Внаслідок Чорнобильської катастрофи в Україні залишаються забрудненими 6,7 млн. га земель, з них 1,2 млн. га сільськогосподарських угідь із щільністю радіоактивного забруднення ґрунту цезієм-137 понад 37 кБк/м<sup>2</sup>. Підвищений радіаційний фон і досі спостерігається на третині території нашої держави [234].

У зв'язку з цим оцінка стану забруднених радіонуклідами територій, виявлення найбільш небезпечних ділянок, вивчення закономірностей міграції радіонуклідів у ґрунтах та зниження їх рівнів із часом є актуальними. Особливо це стосується територій 30-кілометрових зон спостереження АЕС, які піддаються постійному додатковому забрудненню радіоактивними речовинами в результаті їх виробничої діяльності. Зараз, в період реформування земельних відносин, надзвичайно важливо оцінити існуючий стан розвитку територій у зоні спостереження АЕС, на основі моніторингу територій надати рекомендації щодо організації їх раціонального використання та ведення сільськогосподарського виробництва на них [235].

Сучасні проблеми розвитку та організації територій різного функціонального призначення, а особливо радіаційно забруднених, стали предметом дослідження багатьох вітчизняних вчених, серед них праці С. Ю. Булигіна, В. В. Горлачука, О. П. Дмитрів, Д. С. Добряка, П. Г. Казьміра, О. П. Канаша, В. М. Кривова, Л. М. Перовича, А. Я. Сохничя, А. М. Третьяка, П. Г. Черняги та багатьох інших. Накопичено певний досвід практичної реалізації цих результатів:

- запропоновано принципи ведення сільськогосподарського виробництва, лісо- та водогосподарської діяльності на радіоактивно забруднених територіях;
- розглянуто особливості організації земель в умовах радіоактивного забруднення і перспективи їх реабілітації;
- здійснено аналіз проблем пов'язаних із раціональним використанням та охороною земель.

Проте питання зниження забруднення ґрунтів, розробки методів оцінки розвитку територій, що піддаються постійному радіаційному впливу, організації безпечного землекористування на них ще в повній мірі не висвітлені та залишаються відкритими [220].

Території у зоні спостереження атомних електростанцій, маючи плями Чорнобильського походження, зазнають іще постійного радіаційного впливу в процесі виробництва електричної та теплової енергії [229, 233].

Об'єктами впливу АЕС у ЗС є навколишні середовища, а саме:

- природні (повітря, водойми, земельні ресурси, флора, фауна);
- соціальні (населення, соціальна інфраструктура міст і селищ, туристичні та історичні об'єкти, тощо);
- техногенні (сільськогосподарські та промислові об'єкти, інфраструктура).

Потрапляючи в навколишнє середовище, техногенні радіонукліди включаються у процеси міграції, які носять комплексний характер, охоплюючи всі природні компоненти. Первинне радіоактивне забруднення території відбувається при осіданні аерозольних і газоподібних викидів АЕС. Частина радіонуклідів безпосередньо потрапляє на ґрунтовий покрив, а частина затримується рослинністю. З часом концентрація радіонуклідів, затриманих у рослинах, зменшується під впливом дощів, туманів, роси та практично повністю потрапляє у ґрунтовий покрив. При підніманні радіоактивних елементів з ґрунтового покриву вітром чи дощем можливе і вторинне забруднення території. Ці процеси містять у собі горизонтальну та вертикальну міграції радіонуклідів, перехід їх у рослини [236-239]. Далі радіонукліди активно включаються у

харчові ланцюги (рисунок 2) та сприяють внутрішньому опроміненню населення [240]. Тому цілком очевидно, що екологічне відродження України для її сталого розвитку слід розпочинати із землі.

Розробка принципів організації забруднених територій має базуватися на пріоритетності здоров'я людини, а також на соціально-економічну зваженість і обґрунтованість застосовуваних заходів. Рациональне використання земельних ресурсів, ефективне управління територіями, що зазнають постійного радіаційного впливу, сталий розвиток таких територій належать до пріоритетних напрямків сучасності [202, 241-243].

Зони спостереження АЕС насичені високовольтними лініями електропередачі, які створюють потужні електромагнітні поля та займають значні території різного цільового призначення.

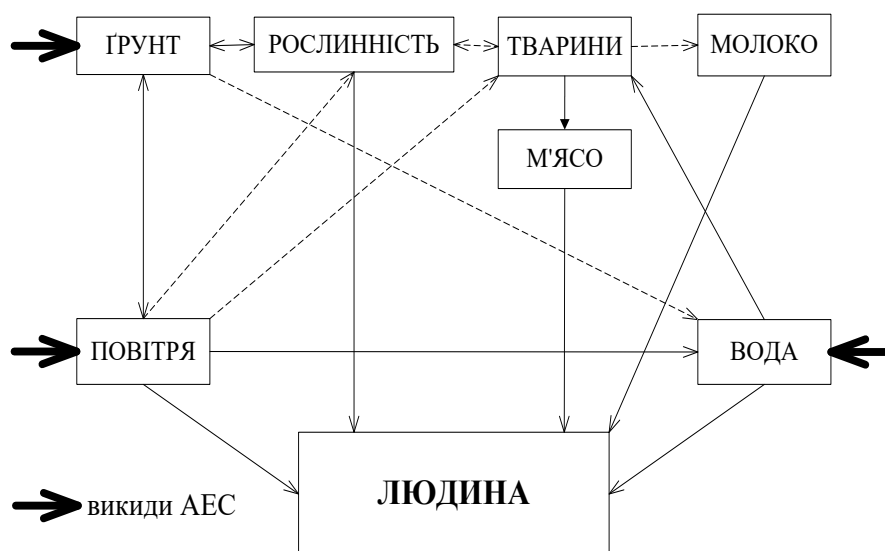


Рисунок 2. Основні шляхи міграції радіонуклідів викидів АЕС [240].

Тому проведення експериментальних досліджень міграції радіонуклідів у ґрунтах як в звичайних умовах, так і під впливом електромагнітного поля ЛЕП високої напруги, є надзвичайно необхідним та актуальним питанням.

Вагомі наукові досягнення у дослідженні шляхів міграції радіонуклідів у навколишньому середовищі, в тому числі ґрунтах, поверхневих і підземних водах, мають роботи [230, 234, 236, 244-246]. Розробці ж відповідних математичних моделей присвячені праці [246-249]. Встановленням

закономірності вертикальної та горизонтальної міграцій радіонуклідів, визначенням дійових факторів цього процесу, розробкою відповідних математичних моделей займались С. І. Веремєнко, Д. М. Гродзинський, І. М. Гудков, Ю. О. Іванов, В. О. Кашпаров, М. О. Клименко, Кравець О. П., Л. В. Перепелятнікова, Б. С. Прістер та інші.

Багаторічні дослідження показали, що основними факторами, що зумовлюють міграцію радіонуклідів у ландшафтно-геохімічних комплексах, є конвективне перенесення (фільтрація атмосферних опадів вглиб ґрунту, капілярний потік вологи до поверхні ґрунту в результаті випаровування, переміщення вологи під дією градієнтів напору та температур), дифузія вільних і адсорбованих іонів [236], перенесення за кореневими системами рослин, перенесення радіонуклідів колоїдними частками [245], життєдіяльність ґрунтових тварин, господарська діяльність людини [237].

Перераховані фактори не є рівнозначними, оскільки інтенсивність і тривалість їх дії різні та залежать від конкретних умов. Найбільш вагомими факторами, що впливають на інтенсивність міграції радіонуклідів у ґрунтах (які не обробляються людиною), є молекулярна дифузія і конвективні потоки вологи.

Встановлено, що одразу після осідання радіонуклідів на поверхню ґрунту внаслідок викидів АЕС, близько 95 % їх зосереджено у верхніх 5 см ґрунту [245]. А отже, незалежно від шляхів надходження в навколишнє середовище радіоактивних ізотопів, ґрунт є головним акумулятором довго живучих радіоізотопів, виступаючи як найбільш потужний геохімічний бар'єр біосфери.

Інтенсивність міграції радіонуклідів у біосфері та ґрунті залежить від взаємодії таких факторів: хімічні властивості радіоактивних ізотопів, кліматичні умови, властивості ґрунту, рельєф, рослинний покрив [241].

Із властивостей радіонуклідів відомо, що на їх поведінку в ґрунті найбільше впливає знак заряду іона, його маса та радіус, здатність до гідролізу, сорбції, хімічні властивості. В цілому, чим вище заряд іона та менше його радіус, тим сильніше він вбирається ґрунтом. Біологічну рухливість у системі «ґрунт-рослина» визначають фізико-хімічні властивості радіонуклідів. Рівень

накопичення цих радіонуклідів і характер їх розподілу в рослинах, залежить, у першу чергу, від потреби в них рослинних організмів. В рослинах у великій кількості концентруються ті радіонукліди, які представляють елементи, що необхідні для нормальної життєдіяльності рослин. Сильний ступінь акумуляції характерний також для радіонуклідів, макрокількості ізотопних носіїв яких відносяться до біологічно важливих елементів. Так,  $^{90}\text{Sr}$  є хімічним аналогом кальцію, а  $^{137}\text{Cs}$  – калію, які відіграють найважливішу роль у регулюванні багатьох процесів обміну речовин у рослинах. Внаслідок того, що калій і кальцій знаходяться у ґрунті в макрокількостях, а радіонукліди в ультраконцентраціях, то в процесі поглинання кореневими системами рослин поживних речовин відбувається конкуренція за місця сорбції на поверхні коріння [230].

Значення коефіцієнта переходу  $^{90}\text{Sr}$  із ґрунту в рослини залежать також від типу ґрунтів. Найбільш високі рівні забруднення рослинності спостерігаються на дерново-підзолистих ґрунтах, особливо легкого механічного складу, менші – на сірих лісових ґрунтах і сіроземах, найнижчі на чорноземах. Порядок розміщення ґрунтів за зменшенням коефіцієнта переходу в рослини  $^{137}\text{Cs}$  наступний: торф'яно-болотні різного ступеня зволоження, дерново-підзолисті піщані, дерново-підзолисті супіщані, дерново-підзолисті суглинкові, сірі лісові, чорноземи. Максимальне накопичення  $^{137}\text{Cs}$  спостерігається на торф'яно-болотних ґрунтах, які використовуються під пасовища та сінокоси.

При забрудненні територій на початковому етапі радіоактивні речовини знаходяться на поверхні ґрунту. Лише через значний час радіонукліди перерозподіляються по профілю під впливом вітру, випадання опадів, а також пересуваються вглиб ґрунту в результаті міграційних процесів.

На рухомість радіонуклідів впливають також властивості ґрунту. За впливом на процеси фіксації радіонуклідів у ґрунті їх можна розмістити в порядку зменшення наступним чином: волога > вміст кальцію і магнію > вбирна здатність ґрунтів > вміст гумусу > кислотність [244, 250].

Досить важливо регулювати водний режим ґрунту. Перезволоження підвищує рухомість радіонуклідів, часта зміна процесу зволоження і

висушування – сприяє їх фіксації. Понижена вологість підвищує рівень забруднення продукції радіонуклідами за рахунок зниження урожайності. Із збільшенням дисперсності ґрунтових частинок доступність радіонуклідів рослинам знижується. Найбільший вплив на рухливість радіонуклідів у ґрунтах мають частинки фізичної глини та мулу, що володіють більшою поглинальною здатністю у порівнянні з більш крупними фракціями. Ґрунти, які характеризуються дуже низьким вмістом глинистих часток мають слабе поглинання  $^{137}\text{Cs}$ , що дає можливість йому вільно мігрувати в ґрунті і бути біологічно доступним для рослин. Це стосується дерново-підзолистих, піщаних і торфових ґрунтів. Коефіцієнти переходу на цих ґрунтах можуть бути в декілька разів вищі, ніж на суглинках, що призводить до інтенсивного їх забруднення [241].

Ті фактори, що визначають рухомість радіонуклідів у ґрунті, визначають і рівень накопичення їх рослинами. При чому, якщо фактор сприяє фіксації радіонуклідів ґрунтом, то інтенсивність накопичення їх в рослинах зменшується. В загальному, чим важчий гранулометричний склад ґрунту, більше набухаючих колоїдів, вище ступінь насичення кальцієм і магнієм, тим менше надходить радіонуклідів в рослини.

Всі види вбирної здатності ґрунту (механічна, фізична, хімічна, обмінна, біологічна) можуть бути одночасно задіяні у поглинанні і фіксації радіонуклідів. Роль того чи іншого виду вбирної здатності ґрунту залежить від виду радіоактивних елементів, їх властивостей, форми хімічних сполук і розміру часток у складі яких вони потрапляють у ґрунт.

Не менш важливе значення має кислотність ґрунтового розчину. Так зміна реакції ґрунтового покриву від сильно кислого ( $\text{pH}=4,0$ ) до лужного ( $\text{pH}=8,5$ ) знижує накопичення радіоактивних ізотопів стронцію, цезію, рубідію у 2-4 рази, а церію-144 в 10-106 разів. Це відбувається завдяки тому, що з підвищенням кислотності сполуки цих хімічних елементів гідролізуються і переходять в малодоступні рослинам форми.



Кількість органічної речовини (гумусу) чинить різний вплив на поведінку радіонуклідів у ґрунтах. Високий вміст фульвокислот, може сприяти формуванню рухомих комплексів з радіонуклідами, тому на кислих ґрунтах і особливо на торфових, коефіцієнти переходу радіонуклідів у 20-30 разів вищі, ніж на нейтральних. При цьому ґрунт стає чистішим, а рослини забруднюються радіоактивними речовинами. Гуматний тип гумусу, характерний для чорноземів, знижує надходження радіонуклідів в рослини.

У процесах накопичення радіонуклідів рослинами відіграють особливості мінерального живлення, тривалість вегетаційного періоду, розвиток і інші їх біологічні ознаки. Особливості будови рослин також відіграють роль. При однакових умовах різниця в накопиченні радіонуклідів різними видами рослин може складати десятки і сотні разів. Так, бобові культури накопичують більше кальцію, а відповідно накопичують більше стронцію, ніж злакові. Радіоактивного цезію накопичується більше в тих частинах рослин, які містять більше калію.

Однією із причин, що впливають на рівень накопичення радіонуклідів, є глибина розміщення корневих систем. Більше забруднюється продукція тих культур, у яких кореневі системи розміщені поверхнево і поглинають поживні елементи з верхніх забруднених горизонтів ґрунту. Тому забрудненою є продукція з природних та культурних сінокосів і пасовищ. Після випадання радіоактивних часток на поверхню ґрунту від 65 до 90 % їх утримується дерниною трав, а тому ці радіонукліди легкодоступні рослинам і швидко поглинаються ними [250].

Форми рельєфу розглядаються як головний критерій формування поверхневого стоку і водного механічного переміщення радіоактивних речовин. Особливості рельєфу можуть як перешкоджати (затримувати), так і сприяти перерозподілу радіонуклідів між ландшафтами та їх елементами. З усіх видів міграції водна механічна і водна фізико-хімічна визначають основні особливості перерозподілу радіонуклідів як з радіальними (вертикальними), так і з латеральними (горизонтальними) потоками води.

Винесення радіоактивних ізотопів з водними потоками відбувається найбільше на дні ерозійної мережі. Транзит, тобто перенесення з частковою акумуляцією радіонуклідів, головним чином в результаті площинного змиву, характерний для схилів, а також сильно розмежованих рівнин. Акумуляція речовин спостерігається на основних вирівняних поверхнях міжрічкових і давньоалювіальних рівнин, а також у замкнутих западинах [238, 245-246].

Науковцями встановлена залежність міграційних процесів радіонуклідів від комплексу фізико-хімічних, кліматичних, геохімічних, біологічних чинників. Інколи дані є суперечливими, через недостатню вивченість поставленої проблеми. Разом з тим залишаються маловідомими механізми міграції радіонуклідів у ґрунтах під впливом електромагнітного поля ліній електропередачі високої напруги.

З огляду на зазначене вище, автором роботи виконане більш детальне вивчення питання міграції радіонуклідів у ґрунтах під впливом електромагнітного поля ліній електропередачі високої напруги. Дослідження проводилися в межах території зони спостереження Хмельницької АЕС. Вибір об'єкта дослідження зумовлений його природними та агрокліматичними особливостями місця розташування, які не мають жодна із зон спостережень інших атомних електростанцій: зона спостереження Хмельницької АЕС розташована у природно-кліматичних зонах Полісся та Лісостепу.

Навколо ХАЕС виділяють такі зони: 30-кілометрова зона спостережень та санітарно-захисна зона радіусом 2,7 км [223]. Загальна площа зони спостережень складає 2826,0 км<sup>2</sup>, з них 1766,25 км<sup>2</sup> – землі Хмельницької області та 1059,75 км<sup>2</sup> – Рівненської області. Території у зоні спостереження Хмельницької АЕС насичені високовольтними лініями електропередачі та характеризуються заляганням переважно дерново-підзолистих ґрунтів. Щільність забруднення територій <sup>137</sup>Cs у зоні спостереження Хмельницької АЕС становить 2 - 10 кБк/м<sup>2</sup>. Тому експериментальне дослідження міграції радіонуклідів як у звичайних умовах, так і під впливом електромагнітного поля ЛЕП на даній території є необхідним.

Для дослідження міграції радіонуклідів нами вибрано земельну ділянку сільськогосподарського призначення (луки) на радіоактивно забрудненій території із врахуванням того, щоб через неї проходила високовольтна лінія електропередачі (750 кВ) та залягали дерново-підзолисті ґрунти [251, 252].

Під час відбору проб нами в польових умовах за [253] встановлено профіль ґрунту (рисунок 3). За описом профілю – це дерново-середньопідзолистий ґрунт.

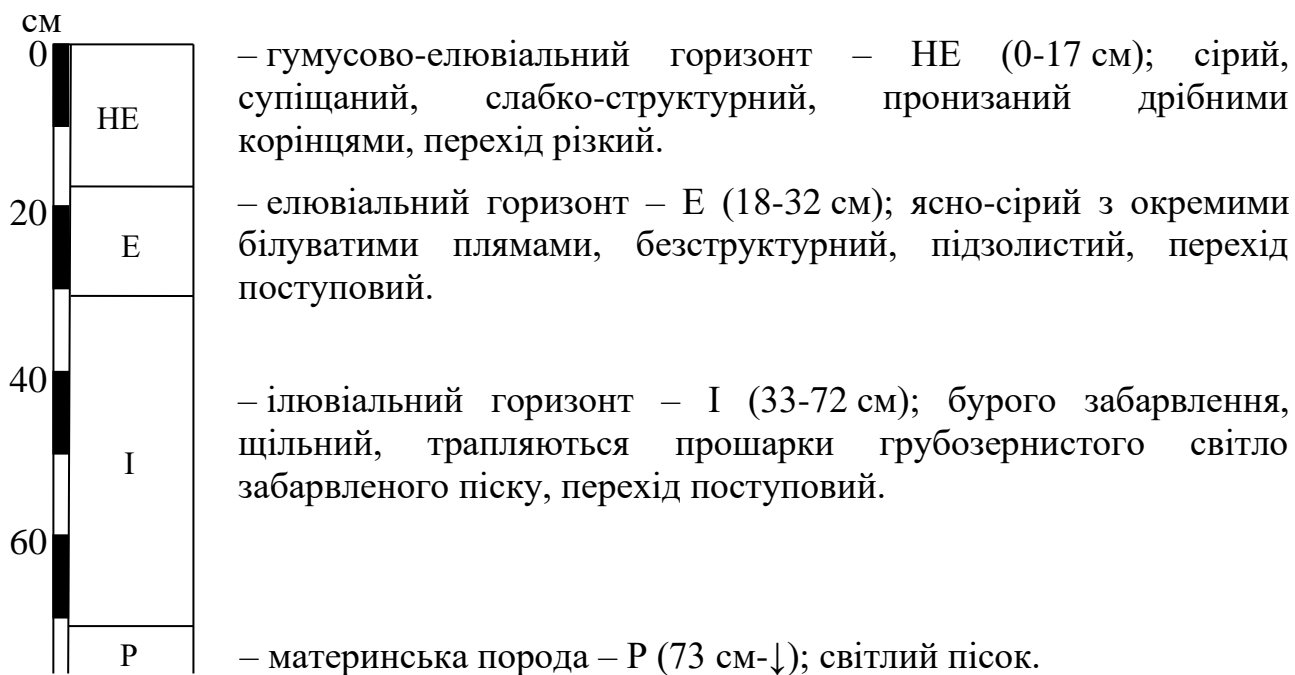


Рисунок 3. Профіль ґрунту з місця відбору проб.

Враховуючи дослідження [232], проби відбиралися з чотирьох шурфів, розташованих із обох сторін від осі високовольтної лінії електропередач на відстані 10 (шурф №1 та №3) та 45 (шурф №2 та №4) метрів. Схема розташування шурфів наведена на рисунку 4.

Глибина відбору зразків ґрунту в кожному шурфі становила відповідно 0-5, 5-10, 10-15, 15-20, 20-30, 30-40, 40-50 см відносно поверхні ґрунту. Проби ґрунту згідно [230] відбиралися у поліетиленові кульки та висушувалися декілька днів при нормальних умовах.

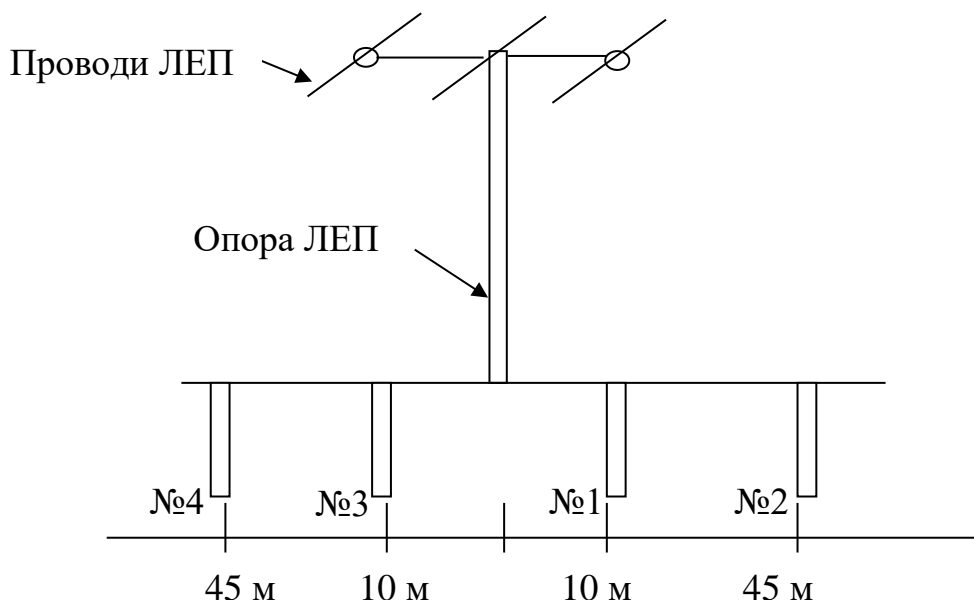


Рисунок 4. Схема розташування шурфів відносно осі високовольтної ЛЕП.

Вимірювання загальної  $\beta$ -активності відібраних зразків ґрунту проводилися на радіометрі. Для цього висушений ґрунт насипали у кювету та проводили 20 вимірювань протягом 100 секунд кожне.

$\gamma$ - спектри радіонуклідів, що знаходились в досліджуваному ґрунті, визначалися на 256-каналному сцинтиляційному  $\gamma$ -спектрометрі. Експозиція одного вимірювання становила 3 год. Результати вимірювань  $\beta$ - та  $\gamma$ - активності відібраних зразків було опрацьовано за допомогою програмного забезпечення Microsoft Excel (табл. 1 – 5).

Таблиця 1.

Результати вимірювань загальної  $\beta$ -активності (шурф №1)

№ шурфу	1							
	0	5	10	15	20	30	40	50
Глибина, см								
Питома активність, Бк/кг	702,6	737,9	412,9	237,1	144,4	59,1	84,1	25,0
Абсолютна похибка, Бк/кг	94,5	98,4	86,2	69,2	77,7	61,6	47,6	46,9
Відносна похибка, %	13,5	13,3	20,9	29,2	53,8	104,2	56,6	281,6

Таблиця 2.

Результати вимірювань загальної  $\beta$ -активності (шурф №2)

№ шурфу	2							
	0	5	10	15	20	30	40	50
Глибина, см								
Питома активність, Бк/кг	1028,0	688,4	582,3	592,7	856,9	140,0	145,3	35,3
Абсолютна похибка, Бк/кг	133,9	101,5	101,3	85,2	97,7	48,9	49,1	47,0
Відносна похибка, %	13,0	14,7	17,4	14,4	11,4	34,9	33,8	133,0

Таблиця 3.

Результати вимірювань загальної  $\beta$ -активності (шурф №3)

№ шурфу	3							
	0	5	10	15	20	30	40	50
Глибина, см								
Питома активність, Бк/кг	698,8	750,0	390,4	250,6	151,1	65,2	70,0	20,3
Абсолютна похибка, Бк/кг	92,1	99,0	82,1	75,2	78,3	59,2	46,8	44,3
Відносна похибка, %	12,8	16,1	18,3	35,9	47,6	98,7	50,2	260,0

Таблиця 4.

Результати вимірювань загальної  $\beta$ -активності (шурф №4)

№ шурфу	4							
	0	5	10	15	20	30	40	50
Глибина, см								
Питома активність, Бк/кг	1019,9	697,4	563,1	600,8	859,4	146,0	130,2	30,7
Абсолютна похибка, Бк/кг	115,2	109,1	98,5	89,2	98,7	49,6	42,4	45,1
Відносна похибка, %	11,3	18,5	15,1	19,3	10,6	41,2	28,0	128,0

Таблиця 5.

Результати вимірювань  $\gamma$ -активності  $^{137}\text{Cs}$  (шурф №2)

№ шурфу	2							
	0	5	10	15	20	30	40	50
Глибина, см								
Питома активність, Бк/кг	1168,0	1358,0	1089,0	980,2	1404,0	133,1	49,3	-
Абсолютна похибка, Бк/кг	106,5	87,8	78,3	78,1	85,4	50,4	38,3	-
Відносна похибка, %	9,1	6,5	7,2	8,0	6,1	37,8	77,7	-

Еталоном був спеціальний зразок ґрунту взятого на глибині 50 см шурфу №2 з фактично нульовою активністю. У даний зразок вводився розчин  $^{137}\text{Cs}$  з відомою активністю.

В ході дослідження у  $\gamma$ - спектрах зразків ґрунту виявлено чітку смугу  $^{137}\text{Cs}$ , а також смуги малої інтенсивності, які відповідають слідам інших радіонуклідів.

Аналіз отриманих результатів показав, що розподіл  $\beta$ - та  $\gamma$ - активності з глибиною подібний. На рисунках 5 та 6 показана залежність питомої  $\beta$ - активності від глибини ґрунту.

Як видно з рисунків 5 і 6 кожен із графіків містить три смуги I, II і III питомої активності.

Смуга I відповідає підвищеній активності ґрунту з максимумом на глибині 42 см і пов'язана з міграцією найбільш рухливих іонів радіонукліду. Це можуть бути вільні іони або фізично адсорбовані з невеликою енергією зв'язку.

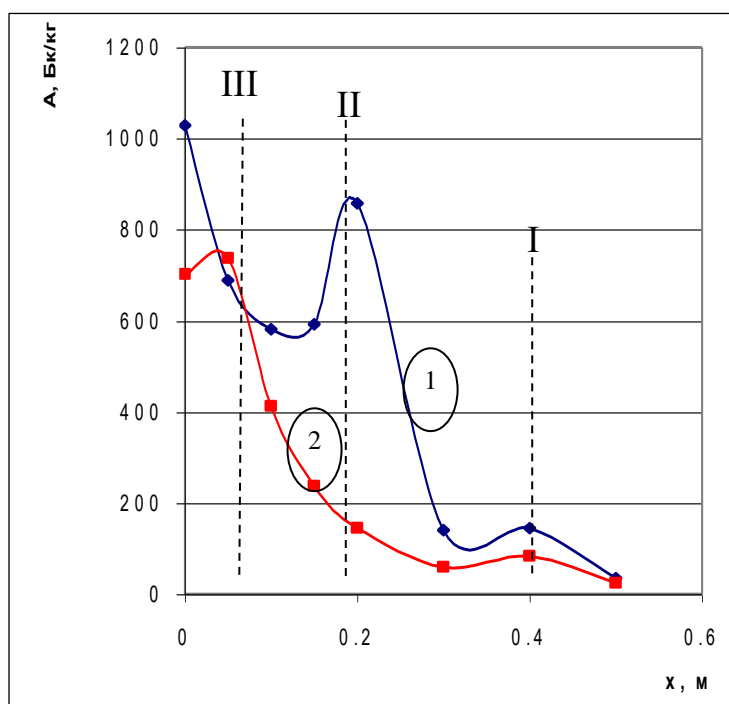


Рисунок 5. Залежність питомої  $\beta$ - активності ґрунту від глибини для проб взятих на відстані 45м від лінії електропередачі (шурф №2) – крива 1, і для проб, взятих під лінією електропередачі (шурф №1) – крива 2.

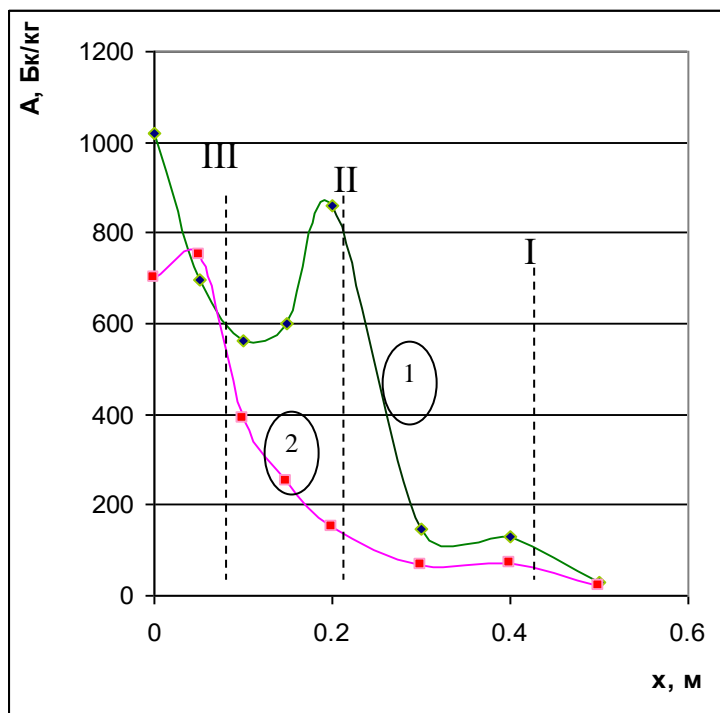


Рисунок 6. Залежність питомої  $\beta$ - активності ґрунту від глибини для проб взятих на відстані 45м від лінії електропередачі (шурф №4) – крива 1, і для проб, взятих під лінією електропередачі (шурф №3) – крива 2.

Смуга II відповідає підвищеній активності ґрунту з максимумом на глибині біля 20 см і пов'язана з міграцією іонів радіонуклідів середньої рухливості. Ними можуть бути фізично адсорбовані іони з середньою енергією зв'язку.

Смуга II для кривої 2 малої інтенсивності і виражена слабо.

Смуга III відповідає підвищеній активності в приповерхневому шарі ґрунту (0-10 см) і пов'язана з міграцією малорухливих іонів. Ними можуть бути хімічно зв'язані іони з великою енергією зв'язку.

Узагальнюючи вищесказане, отримуємо результати, що вплив електромагнітного поля лінії електропередачі проявляється в загальному зменшенні питомої активності ґрунту (рисунок 5 – 6, крива 2). Найбільш суттєво електромагнітне поле зменшує активність смуги II з максимумом на глибині 18 - 20 см.

Катіони  $^{90}\text{Sr}$  і  $^{137}\text{Cs}$  можуть перебувати у ґрунті в складі хімічних сполук в різних фізичних станах: у вільному стані в водорозчинній формі ґрунту; фізично

адсорбовані мінеральними частинками ґрунту (обмінна форма); хімічно зв'язані з органічними та неорганічними сполуками ґрунту (фіксована форма перебування у ґрунті). Водорозчинні сполуки, як правило, є доступними і придатними до міграції у ґрунті. Обмінна форма розглядається як резерв водорозчинної. Внаслідок теплових коливань і дії фізичних полів може відбуватися десорбція цих іонів і їх перехід у водний розчин, тобто у вільний стан. Перехід катіонів у водний розчин із фіксованої групи є малоймовірним через їх малу рухливість.

Серед можливих механізмів міграції радіонуклідів у ґрунті нами було виділено дифузію і дрейф іонів у фізичних полях, зокрема в гідродинамічному полі рухомої рідини і в полі сили земного тяжіння [251].

При випаданні атмосферних опадів, таненні снігу, утворюються потоки води, спрямовані вглиб ґрунту. На іон радіонукліду в такому потоці будуть діяти сила в'язкого тертя та сила земного тяжіння, спрямовані вертикально вниз. Наявність цих сил призводить до дрейфу іонів вглиб ґрунту з певною дрейфовою швидкістю. Для математичного опису цих процесів використаємо рівняння дифузії [254]:

$$\frac{\partial n}{\partial t} = V_0 \frac{\partial n}{\partial x} + D \frac{\partial^2 n}{\partial x^2}, \quad (1)$$

де  $n$  – концентрація радіонуклідів;

$t$  – час;

$V_0$  – середня швидкість дрейфу радіонуклідів;

$x$  – координата, спрямована вглиб ґрунту вертикально вниз;

$D$  – коефіцієнт дифузії радіонуклідів.

Розв'язок диференціального рівняння (1) знайдемо у формі функції Гаусса:

$$n = n_0 \cdot t^{-\frac{1}{2}} \exp\left(-\frac{(x - V_0 t)^2}{4Dt}\right), \quad (2)$$

де  $n_0$  – початкова концентрація радіонуклідів у ґрунті.

Залежність (2) показує розподіл концентрації радіонуклідів  $n$  від глибини ґрунту  $x$  для різних моментів часу  $t$ . Для наочного представлення залежності (2)



покажемо її у вигляді графіків на рисунку 7. При цьому концентрацію радіонуклідів, час та глибину ґрунту представимо у відносних одиницях.

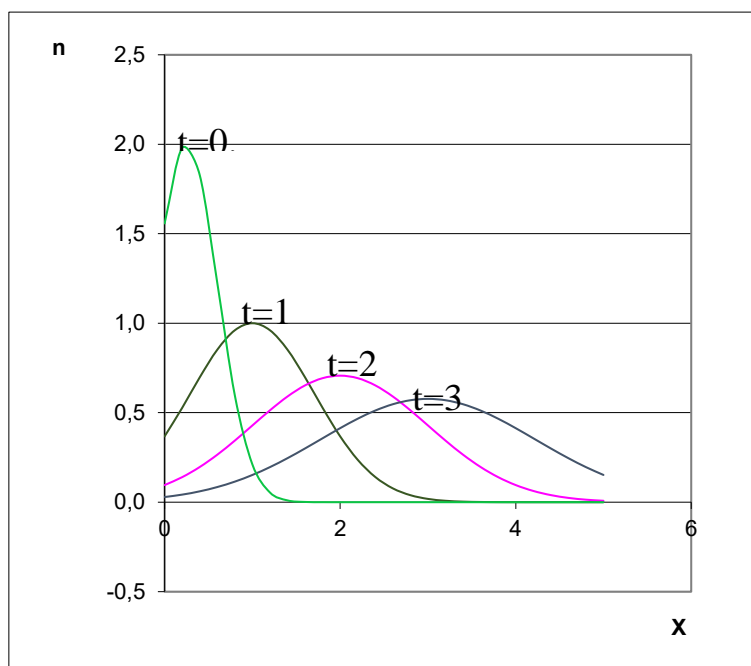


Рисунок 7. Розподіл концентрації радіонуклідів  $n$  за глибиною  $x$  у різні моменти часу  $t$ .

Як видно з рисунку 7, із збільшенням кожного моменту часу максимум розподілу концентрації зміщується вглиб ґрунту. Спостерігається також зменшення величини максимуму концентрації радіонуклідів і розширення смуги їх розподілу.

Враховуючи фізико-хімічну міграцію радіонуклідів у ґрунті, а саме: їх дифузію, дрейф, адсорбцію та десорбцію, рівняння (1) матиме вигляд [251]:

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \alpha N f - \beta n N (1 - f) + V_0 \frac{\partial n}{\partial x} + D \frac{\partial^2 n}{\partial x^2}, \quad (3)$$

де  $n$  – концентрація радіонуклідів;

$t$  – час;

$\alpha$  – коефіцієнт генерації;

$N$  – концентрація центрів адсорбції радіонуклідів;

$f$  – функція розподілу, яка характеризує заповнення центрів адсорбції іонами;

$\beta$  – коефіцієнт захоплення вільного іона центром адсорбції;

$V_0$  – середня швидкість дрейфу радіонуклідів;

$x$  – координата, спрямована вглиб ґрунту вертикально вниз;

$D$  – коефіцієнт дифузії радіонуклідів.

Тобто, в результаті ми отримали фізико-математичну модель міграції радіонуклідів у ґрунті.

Розв'язок рівняння (3) має вигляд:

$$n = \frac{\alpha f}{\beta(1-f)} + n_0 t^{-\frac{1}{2}} \exp\left(-\frac{\left(x \pm \sqrt{V_0^2 + 4Da \cdot t}\right)^2}{4Dt} - \frac{V_0 \pm \sqrt{V_0^2 + 4Da}}{2D} x\right), \quad (4)$$

$$\text{де} \quad a = \beta N(1-f). \quad (5)$$

Функцію заповнення центрів адсорбції іонами радіонукліда представимо формулою Больцмана:

$$f = c \cdot \exp\left(-\frac{E_i}{kT}\right), \quad (6)$$

де  $c$  – константа;

$E_i$  – енергія активації  $i$ -того центра адсорбції;

$k$  – постійна Больцмана;

$T$  – абсолютна температура ґрунту.

Активність радіоактивного елемента може бути визначена так:

$$A = A_0 e^{-\lambda t} = n \lambda e^{-\lambda t}, \quad (7)$$

де  $A_0$  – активність в початковий момент часу;

$\lambda$  – постійна радіоактивного розпаду, яка дорівнює:

$$\lambda = \frac{\ln 2}{T}, \quad (8)$$

де  $T$  – період напіврозпаду.

Підставимо (4) в (7) і отримаємо:

$$A = \left[ \frac{\alpha f}{\beta(1-f)} + n_0 t^{-\frac{1}{2}} \exp\left(-\frac{\left(x \pm \sqrt{V_0^2 + 4Da \cdot t}\right)^2}{4Dt} - \frac{V_0 \pm \sqrt{V_0^2 + 4Da}}{2D} x\right) \right] \cdot \lambda \cdot \exp(-\lambda t). \quad (9)$$

Отже, отримана нами формула (9) разом з формулою (6) дозволяє визначити питому активність ґрунту в різні моменти часу на різній глибині.

На рисунку 8 показано теоретично розрахований загальний розподіл питомої активності ґрунту: для фізично адсорбованих радіонуклідів з малою енергією зв'язку, для фізично адсорбованих радіонуклідів з середньою енергією зв'язку та для хімічно зв'язаних радіонуклідів.

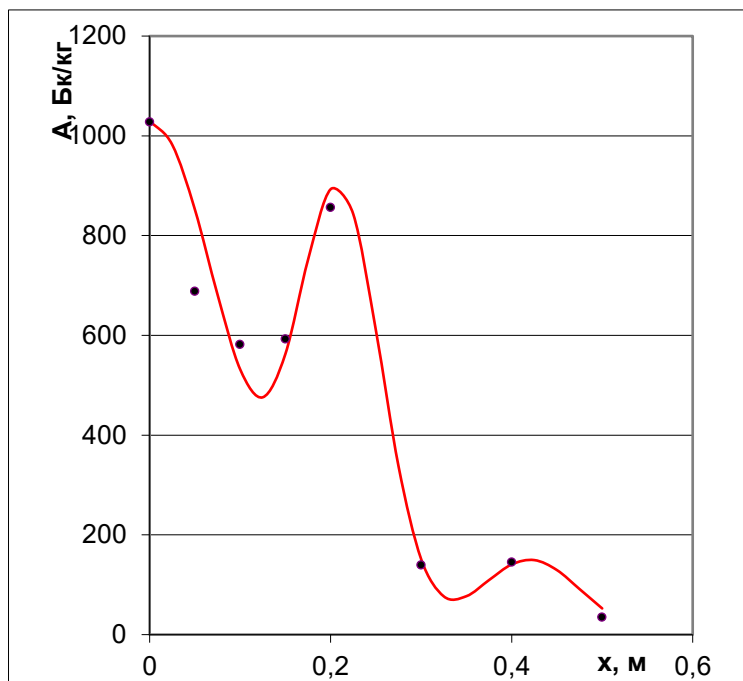


Рисунок 8. Залежність питомої активності ґрунту від глибини (суцільна лінія – теоретична залежність, • – експериментальні дані (шурф №2, таблиця 2)).

За даними рисунку 8 попередньо встановлено, що теоретичні розрахунки (суцільна лінія червоного кольору) добре узгоджуються із експериментальними даними. Співставлення теоретичних розрахунків із експериментальними даними дозволило визначити коефіцієнт дифузії і швидкість дрейфу радіонуклідів. Числові значення цих величин представлені в таблиці 6.

Таблиця 6.

Коефіцієнт дифузії та швидкість дрейфу радіонуклідів

Параметр	Смуга I	Смуга II	Смуга III
Коефіцієнт дифузії, м <sup>2</sup> /с	3,21*10 <sup>-12</sup>	2,31*10 <sup>-12</sup>	6,86*10 <sup>-12</sup>
Швидкість дрейфу, м/с	8,86*10 <sup>-10</sup>	4,43*10 <sup>-10</sup>	0

Слід зазначити, що дана математична модель міграції вглиб ґрунту стосується не лише радіонуклідів, а також і будь-яких інших іонів забруднюючих речовин, що в початковий момент часу знаходяться на поверхні, наприклад, внаслідок одноразового великого забруднення [251].

Проте навколо лінії електропередач виникають електричне і магнітне поля. Нехай в деякій точці простору напруженість електричного поля рівна:

$$\vec{E} = E_0 \sin \omega t, \quad (10)$$

де  $E_0$  – амплітудне значення напруженості електричного поля;

$\omega$  – циклічна частота змінного струму;

$t$  – час.

На іон цезію чи стронцію з боку електричного поля буде діяти кулонівська сила:

$$\vec{F}_k = q \vec{E} = q E_0 \sin \omega t, \quad (11)$$

де  $q$  – електричний заряд.

Нехай в деякій точці простору індукція магнітного поля рівна:

$$\vec{B} = B_0 \sin \omega t, \quad (12)$$

де  $B_0$  – амплітудне значення індукції магнітного поля.

На іон цезію чи стронцію з боку магнітного поля може діяти сила Лоренца:

$$\vec{F}_l = q \left( \vec{V} \times \vec{B} \right) = \left( \vec{V} \times B_0 \right) q \sin \omega t, \quad (13)$$

де  $V$  – швидкість руху іона.

Розрахунки показують, що в даних умовах сила Лоренца значно менша від кулонівської і нею можна знехтувати. Тому надалі будемо враховувати лише електричну силу. З формули (11) слідує, що електрична сила змінюється за гармонічним законом. Тому іон під дією змінного електричного поля буде здійснювати гармонічні коливання навколо деякого положення рівноваги і не буде здійснювати макроскопічні переміщення. Таким чином, електричне і

магнітне поля лінії електропередач змінного струму безпосередньо не впливають на процеси міграції радіонуклідів у ґрунті [252].

Визначимо енергію вимушених коливань іона під дією змінного електричного поля. Запишемо диференціальне рівняння коливань на основі другого закону Ньютона:

$$m \frac{\partial^2 x}{\partial t^2} = -kx - r \frac{\partial x}{\partial t} + qE_o \sin \omega t, \quad (14)$$

де  $m$  – маса іона;

$x$  – зміщення іона від положення рівноваги;

$k$  – коефіцієнт квазіпружної сили в центрі адсорбції;

$r$  – коефіцієнт опору.

Введемо позначення:

$$\omega_o = \frac{k}{m}; \quad \beta = \frac{r}{2m}. \quad (15)$$

Тоді з врахуванням (15) рівняння (14) набере вигляду:

$$\frac{\partial^2 x}{\partial t^2} = -\omega_o^2 x - 2\beta \frac{\partial x}{\partial t} + \frac{qE_o}{m} \sin \omega t. \quad (16)$$

Розв'язавши диференціальне рівняння (16), одержимо:

$$x = A_o e^{-\beta t} \sin(\omega t + \varphi) + A \sin(\omega t - \varphi). \quad (17)$$

Розглянемо стаціонарний випадок, коли  $t \gg 1/\beta$ . З врахуванням цієї умови, перший доданок виразу (17) буде прямувати до нуля, тоді даний вираз набере вигляду:

$$A = \frac{qE_o}{m \sqrt{4\beta^2 \omega^2 + (\omega_o^2 - \omega^2)^2}}, \quad (20)$$

де

$$x = \frac{qE_o}{m \sqrt{4\beta^2 \omega^2 + (\omega_o^2 - \omega^2)^2}} \sin(\omega t - \varphi). \quad (21)$$

Продиференціюємо вираз (21) і визначимо швидкість коливань іона:

$$V = \frac{qE_0\varpi}{m\sqrt{4\beta^2\varpi^2 + (\varpi_0^2 - \varpi^2)^2}} \sin(\varpi t - \varphi). \quad (22)$$

Максимальне значення швидкості рівне:

$$V_M = \frac{qE_0\varpi}{m\sqrt{4\beta^2\varpi^2 + (\varpi_0^2 - \varpi^2)^2}}. \quad (23)$$

Енергія вимушених коливань іона рівна максимальній кінетичній енергії коливань іона:

$$E_{ел} = \frac{mV_M^2}{2}. \quad (24)$$

Підставимо (23) в (24):

$$E_{ел} = \frac{q^2 E_0^2 \varpi^2}{2m \left[ 4\beta^2 \varpi^2 + (\varpi_0^2 - \varpi^2)^2 \right]}. \quad (25)$$

Функція Больцмана заповнення центрів адсорбції іонами радіонукліда при наявності змінного електричного поля набере вигляду:

$$f = c \cdot \exp\left(\frac{E_{ел}}{kT} - \frac{E_i}{kT}\right). \quad (26)$$

Вираз (26) вказує на те, що змінне електричне поле збільшує імовірність десорбції іонів радіонукліду і переходу їх із зв'язаного у вільний стан. Внаслідок цього збільшується швидкість міграції іонів радіонукліду вглиб ґрунту.

На підставі формул (9) та (26) нами визначено розподіл питомої активності ґрунту з глибиною при дії на ґрунт електричного поля лінії електропередачі змінного струму:

$$A = \left[ \frac{\alpha f}{\beta(1-f)} + n_0 t^{-\frac{1}{2}} \exp\left( -\frac{\left(x \pm \sqrt{V_0^2 + 4Da \cdot t}\right)^2}{4Dt} - \frac{V_0 \pm \sqrt{V_0^2 + 4Da}}{2D} x \right) \right] \cdot \lambda \cdot \exp(-\lambda t), \quad (2.26)$$

де  $\lambda$  – постійна радіоактивного розпаду радіонукліду внаслідок його природного розпаду.

Величина  $a$  обчислюється за формулою (5).

На рисунку 9 приведено теоретичні розрахунки загального розподілу питомої активності ґрунту з глибиною при дії на ґрунт електричного поля ЛЕП змінного струму для фізично адсорбованих радіонуклідів з малою енергією зв'язку, для фізично адсорбованих радіонуклідів з середньою енергією зв'язку і для хімічно зв'язаних радіонуклідів.

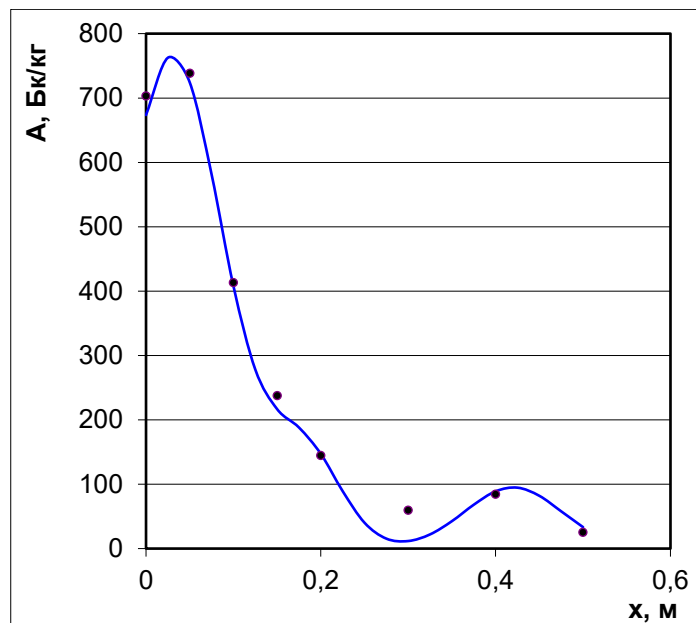


Рисунок 9. Залежність питомої активності ґрунту від глибини в області дії електричного поля (суцільна лінія – теоретична залежність, • – експериментальні дані (шурф №1, таблиця 1))

На основі аналізу даних теоретичної кривої загального розподілу питомої активності ґрунту (рисунок 9 – суцільна лінія синього кольору) попередньо встановлено, що теоретичні розрахунки добре узгоджуються із експериментальними даними (шурф №1, таблиця 1).

Співставлення теоретичних розрахунків з експериментальними даними дозволило визначити коефіцієнт дифузії і швидкість дрейфу радіонуклідів. Числові значення цих величин представлені в таблиці 7.

При порівнянні даних таблиць 6 та 7 встановлено, що електричне поле ЛЕП високої напруги слабо впливає на коефіцієнт дифузії і швидкість дрейфу радіонуклідів. Його дія зводиться до збільшення ймовірності десорбції зв'язаних радіонуклідів і переходу їх у вільний стан. Вільні радіонукліди швидко мігрують

вглиб ґрунту. Даний процес призводить до загального зменшення питомої активності ґрунту.

Таблиця 7.  
Коефіцієнт дифузії та швидкість дрейфу радіонуклідів

Параметр	Смуга I	Смуга II	Смуга III
Коефіцієнт дифузії, м <sup>2</sup> /с	3,21*10 <sup>-12</sup>	1,90*10 <sup>-12</sup>	3,73*10 <sup>-12</sup>
Дрейфова швидкість, м/с	8,86*10 <sup>-10</sup>	3,80*10 <sup>-10</sup>	6,33*10 <sup>-10</sup>

Найбільший ефект дії електричного поля проявляється стосовно фізично адсорбованих радіонуклідів із середньою енергією зв'язку. При цьому загальне зменшення питомої активності ґрунту становить 1,97 рази [252].

Вплив електричного поля ЛЕП змінного струму стосується не лише міграції радіонуклідів вглиб ґрунту, а й іонів будь-яких інших речовин. Внаслідок цього відбувається збіднення поверхневого шару ґрунту іонами поживних речовин, що приводить до зменшення його родючості. В цьому полягає одна з причин пригнічення росту рослин під лініями ЛЕП.

Цей факт слід враховувати при впорядкуванні територій сільськогосподарського призначення, проектуванні сівозмін та розрахунку внесення мінеральних та органічних добрив на поля.

Території довкілля атомних електростанцій зазнають постійного радіаційного впливу внаслідок виробничої діяльності енергоблоків. У достатній мірі насичені високовольтними лініями електропередач, переважну частину яких складають повітряні лінії 750 кВ. Кожна із зон впливу АЕС характеризується багатоманітністю і мінливістю ґрунтового покриву, агрокліматичних умов та рельєфу території. Різноманіття природних та антропогенних факторів зумовлює неоднорідність фізико-хімічних і водно-фізичних властивостей, що визначає просторову диференціацію вертикальної та горизонтальної міграції забруднюючих речовин, в тому числі радіонуклідів. Даний фактор слід обов'язково враховувати при організації території 30-кілометрової зони спостереження АЕС для уникнення негативних наслідків радіоактивного забруднення.



При впорядкуванні території зони впливу АЕС слід звернути увагу на: спеціалізацію існуючих сільськогосподарських підприємств; підбір видового складу культур, які планується вирощувати; проведення організаційних, агротехнічних, агрохімічних, лісомеліоративних заходів. Потрібно строго дотримуватись, як системи загальноприйнятих заходів, так і системи спеціальних заходів, направлених на оптимальне впорядкування території і використання земельних угідь, збереження і підвищення їх родючості. Це дасть змогу вирощувати сільськогосподарську продукцію, яка відповідатиме Державним гігієнічним нормам і забезпечить мінімальне опромінення населення.

Для організації території довкілля АЕС, в умовах постійного радіаційного впливу, слід виконати ряд робіт [255], а саме:

- проведення аналізу існуючої організації території та інвентаризації угідь із метою виявлення щільності забруднення; складання відповідних картографічних матеріалів;
- порівняння характеристик ґрунтового покриву території і даних про їх забруднення;
- розрахувати прогнозний вміст забруднюючих речовин у врожаї сільськогосподарських культур;
- побудувати прогноз ефективності проведених заходів і рівня забруднення продукції після їх проведення;
- провести оцінку угідь у відповідності з результатами прогнозу, на якій можливе вирощування культур для певного виду використання (на продовольчі цілі, виробництво кормів, технічну переробку, для отримання насінневого матеріалу, зміни структури посівних площ, організації радіаційного контролю).

Таким чином, в роботі обґрунтовано саме поняття санітарно-захисної зони та зони спостереження АЕС, виконано огляд досліджень впливу роботи атомних електричних станцій на території цих зон, досліджено основні фактори впливу на міграцію радіонуклідів в ґрунті, які мають важливе значення при впорядкуванні території довкілля атомних електростанцій. Створена

математична модель міграції радіонуклідів в ґрунті, отримала експериментальне підтвердження і може бути використана для раціонального використання радіоактивно забруднених територій.

Слід відмітити, що дослідження таких територій, що зазнають постійного техногенного впливу внаслідок виробничої діяльності підприємств, необхідне для регулювання земельних відносин, управління земельними ресурсами, організації раціонального використання та охорони земель, здійсненні землеустрою, проведенні оцінки землі, формуванні та веденні містобудівного кадастру, кадастру інших природних ресурсів, справляння плати за землі. Такі заходи є необхідними при веденні Державного земельного кадастру з метою інформаційного забезпечення органів державної влади та органів місцевого самоврядування, фізичних та юридичних осіб. Це відмічено у Законі про Державний земельний кадастр [235]. А проведення в подальших дослідженнях комплексної оцінки розвитку територій у зонах спостереження АЕС, встановлення та аналіз факторів впливу на розвиток цих територій, створення системи ефективного управління розвитком територій дозволить сформулювати нові принципи організації територій землекористувань у 30-ти кілометрових зонах спостереження АЕС.

## **7.2 Наземне лазерне 3D-сканування як інтегрований процес від збору даних до створення тривимірних моделей**

*Вступ.* Тенденції автоматизації різних сфер виробничої діяльності обумовлені стрімким розвитком мікропроцесорних технологій та цифрових рішень. Сучасні досягнення в цій галузі значно трансформували підходи до організації та управління виробничими процесами, зокрема завдяки розробці комп'ютерних систем підтримки прийняття рішень. Такі системи дозволили мінімізувати вплив людського фактору на якість і обсяги виробленої продукції, забезпечуючи вищу точність та стабільність. У цьому контексті мікропроцесорна техніка виконує ключову роль інтеграційної ланки, яка об'єднує окремі етапи виробничого процесу в єдину технологічну систему.

Особливе місце у цьому процесі посідає інтеграція цифрових технологій збору, обробки й аналізу даних. Поєднання геодезичних методів, фотограмметричних технологій і мікропроцесорних систем створило новий клас пристроїв для просторового дослідження місцевості – наземні лазерні сканери. Ці інноваційні інструменти значно змінили підходи до збору та аналізу просторових даних, зробивши їх більш оперативними та точними.

Наземне лазерне сканування базується на високошвидкісному вимірюванні відстаней від сканера до точок об'єкта і одночасній реєстрації напрямків вимірювань, що включають горизонтальні та вертикальні кути. Таким чином, обчислювані параметри нагадують ті, що використовуються при роботі з електронними тахеометрами. Однак принципова відмінність полягає у повному охопленні об'єкта замість фіксації лише окремих його точок. Ця особливість визначає наземне лазерне сканування як комплексний метод зйомки, кінцевим результатом якого є тривимірна модель об'єкта, відома як хмара точок.

Сучасні системи наземного лазерного сканування дозволяють автоматизувати процес збору даних на таких рівнях, які ще кілька десятиліть тому здавалися недосяжними. Висока точність та деталізація результатів роблять

ці технології незамінними в багатьох галузях, включаючи будівництво, архітектуру, моніторинг інфраструктури, а також у геодезії та наукових дослідженнях. Наземні лазерні сканери стали інструментом, який одночасно скорочує час, потрібний для отримання даних, і підвищує їхню якість, що забезпечує нові можливості для моделювання та аналізу складних об'єктів.

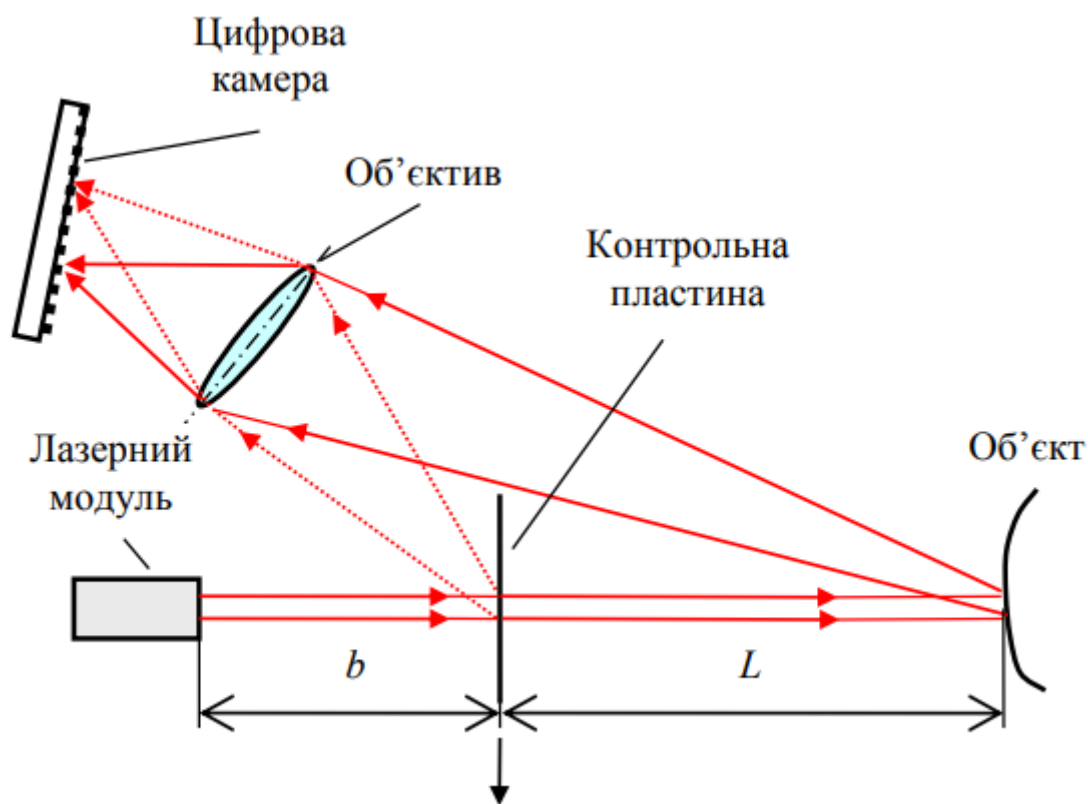
Таким чином, інтеграція мікропроцесорних та цифрових технологій у виробничі процеси не лише прискорює їхню автоматизацію, але й відкриває нові горизонти у зборі та обробці просторової інформації. Наземне лазерне сканування є яскравим прикладом цієї трансформації, поєднуючи передові інженерні рішення з можливістю створення точних тривимірних моделей реального світу.

*Технологія та принципи роботи наземних тривимірних  
лазерних сканувальних систем.*

Наземний лазерний сканер (НЛС) дозволяє створювати тривимірні моделі, представлені хмарами точок, які відображають навколишні об'єкти. Це досягається шляхом визначення положення видимих поверхонь за допомогою відбиття лазерного світла. Сучасні лазерні сканери поділяються на кілька типів, кожен з яких має свої переваги та обмеження, залежно від сфери застосування. Сучасні тривимірні сканувальні системи можна умовно розподілити на три великі групи за методами вимірювання відстані: триангуляційні сканери, імпульсні сканери та фазові сканери [256].

Триангуляційні сканери використовують лазерний промінь, який направляється на поверхню об'єкта, що досліджується. Відбитий від поверхні промінь формує світлову пляму, зображення якої фіксується цифровою камерою. Залежно від відстані до об'єкта, світлова пляма відображається на різних пікселях камери [257]. Для точного калібрування триангуляційного вимірювача відстані застосовується контрольна пластина, що розташована на відомій відстані від сканера. Під час калібрування на цифровому зображенні визначають

положення контрольного пікселя, що дозволяє коригувати параметри вимірювань (рис. 1).



**Рисунок 1.** Схема триангуляційного вимірювача відстані [257]

Метод триангуляції, який використовують ці сканери, був відомий ще до появи лазерних технологій. Він ґрунтується на принципі створення прямокутного трикутника, де одна зі сторін є відстанню між сканером та точкою на об'єкті (катет), яку необхідно визначити. Для цього за допомогою відомого другого катета (бази) і виміряного кута між базою і скануючим промінем можна обчислити відстань, використовуючи основні принципи геометрії. Цей метод дозволяє з високою точністю визначати відстані навіть до малих або складно доступних об'єктів.

Триангуляційний сканер характеризується високою роздільною здатністю, що може досягати десятків мікрометрів, що дозволяє отримувати надзвичайно детальні зображення об'єктів. Однак процес сканування з такою високою точністю займає значний час. Крім того, результат сканування може бути

спотворений, якщо об'єкт або сам сканер рухатимуться під час зйомки. Ці обмеження роблять використання триангуляційних сканерів менш ефективним при необхідності швидкого збору даних або у випадках, коли об'єкти знаходяться в русі.

Імпульсний 3D-сканер складається з лазерного випромінювача та детектора. Лазерний промінь випромінюється зі сканера в певному напрямку, а детектор фіксує час, необхідний для того, щоб відбитий промінь повернувся до нього. Оскільки швидкість світла є сталою величиною, сканер може обчислити відстань до об'єкта, вимірявши час, який світло витрачає на проходження цього шляху за формулою [256]:

$$R = \frac{v \cdot \tau}{2}, \quad (1)$$

де  $v$  – швидкість розповсюдження електромагнітних хвиль;

$\tau$  – вимірний час з моменту подачі сигналу до його прийому.

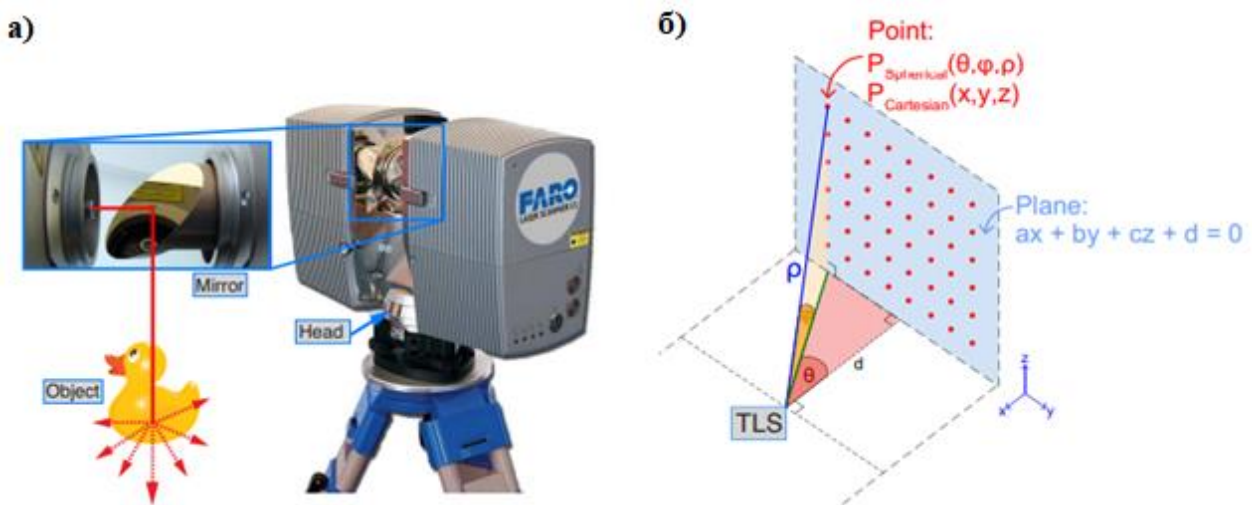
За допомогою цієї інформації 3D-сканер здатен точно визначати відстані до різних точок на об'єкті та створювати його тривимірну модель.

Основною перевагою цього методу вимірювання є здатність охоплювати великі відстані – до кількох сотень метрів, що забезпечується високою потужністю лазера. Така велика дальність дозволяє здійснювати точні вимірювання на значних відстанях, що є важливим для багатьох геодезичних задач. Однак, випромінювання лазерів, які використовуються в таких приладах, може бути небезпечним для зору, тому під час роботи з ними необхідно дотримуватися спеціальних заходів безпеки.

Мінімальна відстань, на якій можливе вимірювання, залежить від конкретної моделі сканера та конструктивних особливостей його корпусу і штативу. Цей параметр може варіюватися в залежності від призначення приладу та типу використовуваного лазера. Для деяких моделей мінімальна відстань може бути дуже маленькою, що дозволяє здійснювати вимірювання в умовах

обмеженого простору. Проте в цілому для більшості приладів характерна здатність проводити вимірювання на значних відстанях, що робить їх універсальними для використання у різних сферах.

Приклад фазового наземного лазерного сканера представлений на рисунку 2 (зліва) [258]. Зазвичай фазовий сканер складається з двох основних елементів: обертового двигуна (сервоприводу) та обертового дзеркала. Комбінація цих двох рухомих частин дозволяє отримувати під час сканування панорамні знімки, які створюють детальне зображення об'єкта.



а) – фазовий наземний лазер; б) – схематичне зображення збору хмари точок.

Точка  $P$  вимірюється в кутових положеннях  $(\theta, \varphi)$ , з діапазоном  $\rho$

**Рисунок 2.** Приклад і принцип роботи фазового наземного лазерного сканера [258]

На кожному етапі горизонтального обертання дзеркало обертається з регулярним вертикальним кроком, що дозволяє направляти лазерні промені в необхідний напрямок. Відбиття кожного лазерного променя, що потрапляє на поверхню об'єкта, вимірюється в напрямку, з якого він був випущений, як показано на рисунку 2 (праворуч). Цей метод вимірювання положення поверхні об'єкта дає змогу отримати величезні обсяги даних за дуже короткий проміжок часу, що робить таке сканування ефективним для роботи з великими та складними об'єктами.

На базі даних методів сформована порівняльна характеристика у вигляді таблиці 1.

**Таблиця 1.**

Аналіз НЛС за методом вимірювання відстаней

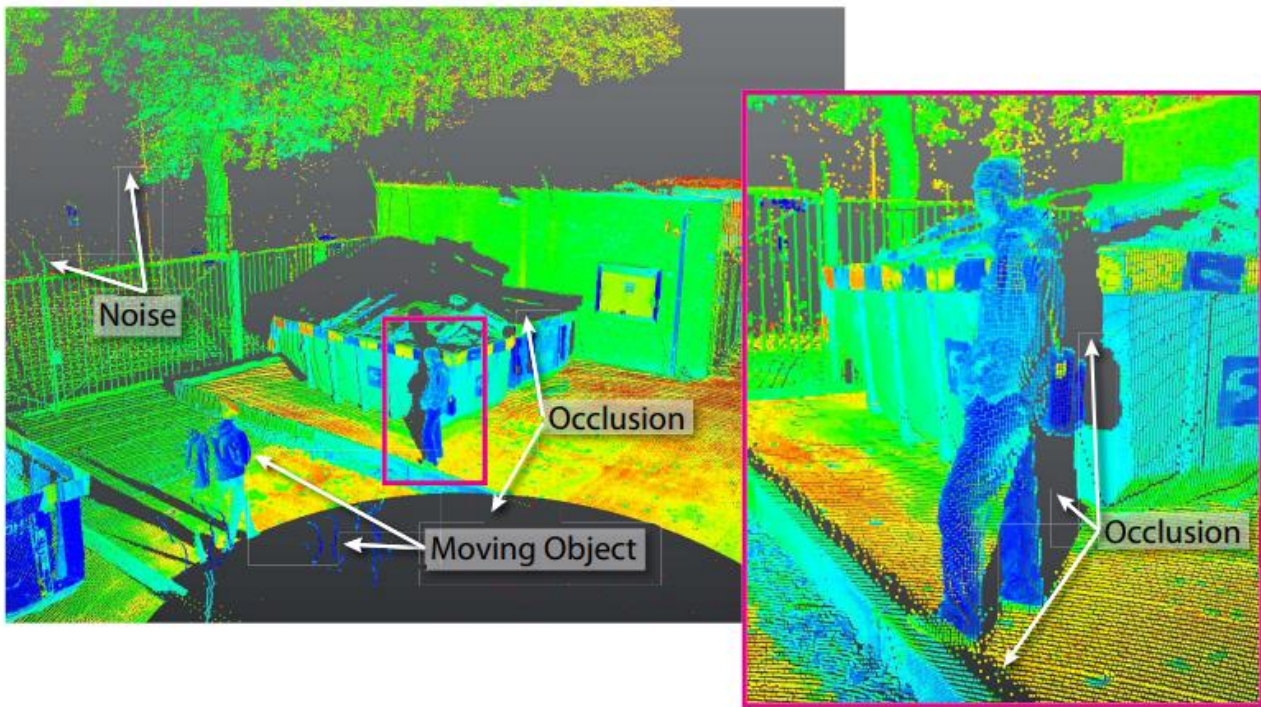
Метод вимірювання	Максимальна відстань, що вимірюється, м	Точність визначення відстаней, мм
Імпульсний метод	50-300	до 10 (25)
Фазовий метод	до 100	до 10
Метод триангуляції	до 5	до 1

Хмара точок зазвичай представляється у вигляді неорганізованих даних, тобто таких, що не прив'язані до будь-якої сітки, в декартових координатах. Для підвищення точності та можливості візуалізації, сканери можуть бути осначені однооб'єктивною дзеркальною камерою, що дозволяє фарбувати хмари точок.

На сьогоднішній день більшість сучасних наземних лазерних сканерів оснащені вбудованими камерами, які розташовані безпосередньо поруч з лазерним випромінювальним пристроєм. Це дозволяє здійснювати отримання кольорових хмар точок швидко і майже безшовно. Таке поєднання лазерного сканування та кольорових даних дає можливість створювати точні та детальні 3D-моделі об'єктів з природними кольорами, що є важливим для подальшого аналізу і візуалізації.

Діапазон таких 3D-об'єктів є надзвичайно широким, починаючи від простих труб на нафтових вишках і закінчуючи моделями цілих міст. Приклад 3D-хмари точок зображено на рисунку 3. Представленні точки  $(x, y, z)$  фарбуються відповідно до значень інтенсивності  $i$  (від 0 до 1), виміряних наземним лазерним сканером, та відображаються відповідно до користувацької кольорової карти RGB для полегшення кращої візуалізації [258].





**Рисунок 3.** Приклад 3D хмари точок [258]

Лазерний сканер захоплює лише ті поверхні, які знаходяться в його прямій видимості, що призводить до утворення закритих ділянок (оклюзій), як показано на рисунку 3. Ці оклюзії є типовими для лазерного сканування, адже певні частини об'єкта можуть бути недоступними для променя через їх розташування або геометричні особливості. Врахування таких закритих ділянок є важливим аспектом при створенні точних 3D-моделей, оскільки вони можуть впливати на точність реконструкції та подальший аналіз об'єкта.

У цьому прикладі показана постійна «мертва зона» приладу – периметр навколо станції стояння пристрою або оклюзійне коло. Це явище зумовлене тим, що сканер не може захоплювати поверхні безпосередньо під собою, оскільки сервопривід і штатив завжди перешкоджають огляду поверхонь, що знаходяться під самим сканером.

Іншим прикладом оклюзії є ситуація, де стояча людина заважає огляду контейнерів на задньому плані. Поверхні, що не потрапляють в пряме поле зору наземного лазерного сканера з однієї точки огляду, часто можуть бути захоплені з іншої точки, де вони вже стають видимими для сканера. Це підкреслює

важливість правильного вибору позицій для сканування і можливості використання кількох точок огляду для отримання повної інформації про об'єкт.

У останнє десятиліття все частіше використовуються фазові лазерні сканери, принципи вимірювання яких дуже схожі на імпульсні. Фазові сканери випромінюють безперервну амплітудно-модульовану хвилю, яка часто модулюється комбінацією кількох різних довжин хвиль. Серед іншого, найкоротша довжина хвилі визначає точність, яку можна досягти, а найдовша довжина хвилі визначає неоднозначність вимірювань. Як показано на рисунку 4, відстань до об'єкта визначається шляхом вимірювання зміщення фази між випроміненим і прийнятим сигналом.

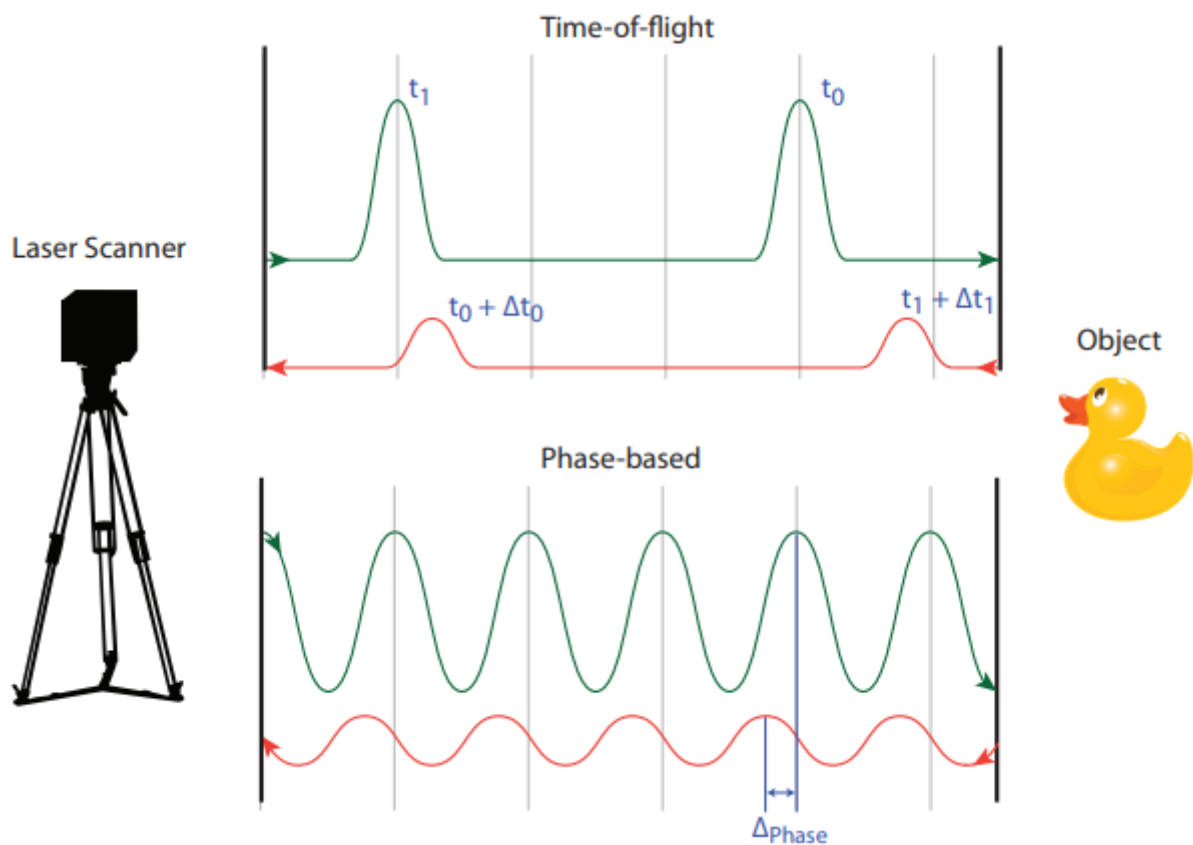


Рисунок 4. Принцип вимірювання відстані лазерними сканерами

[258]

Оскільки лазерні сканери на основі фазового зсуву випромінюють безперервну хвилю, це забезпечує вищу швидкість вимірювань. Висока точність, у свою чергу, досягається переважно завдяки амплітудній модуляції з кількома

довжинами хвиль і більш точному визначенню фазового зсуву. Це дозволяє значно покращити ефективність сканування великих об'єктів, зменшити час, необхідний для збору даних, а також забезпечити високу точність при роботі в складних умовах.

Імпульсні сканери випромінюють вузький лазерний промінь в заданому напрямку і вимірюють сигнал зворотного розсіювання, відбитий поверхнею об'єкта. Як показано на рисунку 4, визначаючи час проходження випроміненого імпульсу в обидва напрямки, можна визначити відстань до об'єкта в заданому напрямку. Цей метод дозволяє сканувати об'єкти на більшому діапазоні відстаней, оскільки імпульсні сканери здатні охоплювати великі відстані і працювати на більш широких територіях. Він є ефективним для вимірювань в умовах, де потрібна висока дальність і швидкість збору даних.

#### *Огляд і класифікація наземних лазерних сканерів.*

На сьогоднішній день розробкою приладів для тривимірного лазерного сканування займається велика кількість компаній, серед яких широко відомі Trimble (США) та Leica Geosystems (Швейцарія), а також Riegl (Австрія), I-Site (Австралія), Zoller+Fröhlich (Німеччина) та інші. Усі ці компанії випускають сканери для різних цілей, орієнтуючись на потреби різних галузей і специфічні вимоги до точності та швидкості збору даних.

Завдання, які вирішуються конкретною моделлю наземного лазерного сканера, визначаються її технічними характеристиками. Основними технічними характеристиками, що дозволяють оцінити можливості НЛС, є [259]:

- дальність дії;
- точність вимірювання відстаней;
- швидкість виконання вимірювань;
- мінімальний кутовий крок сканування;
- кут поля зору;
- діапазони припустимих робочих температур і зовнішніх умов;
- клас безпеки лазера;

- можливість геодезичного орієнтування НЛС;
- споживання напруги, що впливає на тривалість роботи НЛС.

Дальність дії визначає максимальну відстань, на якій наземний лазерний сканер здатний отримати однозначний результат з гарантованими характеристиками точності. Цей параметр залежить від використовуваного методу вимірювання відстаней, потужності лазера, а також відбивної здатності поверхні, що сканується. Чим вища відбивна здатність матеріалу об'єкта, тим більша ймовірність отримання точних даних на великих відстанях. Наприклад, відбиття від гладких або металевих поверхонь забезпечує кращі результати на більших відстанях порівняно з поверхнями, що мають низьку відбивну здатність, такими як асфальт чи бетон.

Точність вимірювання відстаней визначається похибкою одиничного вимірювання і залежить від методу вимірювання та конструкції далекоміра. Значний вплив на точність має розбіжність лазерного випромінювання. Коли відстань вимірюється до площин, які не перпендикулярні до осі променя, або до об'єктів складної форми, що розташовані на великій відстані вздовж осі променя, відбитий сигнал може надходити від кількох елементів поверхні одночасно. Як результат, виміряна відстань відноситиметься до умовної точки, яка може знаходитися поза межами об'єкта. Чим більший розмір лазерної плями, тим більше відстань і координати виміряних точок будуть відрізнятися від свого істинного значення, що може призвести до значних похибок у визначенні форми та розмірів об'єкта, як показано на рисунку 5.

Швидкість виконання вимірювань визначається кількістю точок, що реєструються наземним лазерним сканером за одиницю часу. Цей показник залежить від методу вимірювання відстаней та конструкції блоку розгортки. Комбінація фазового методу вимірювання відстаней з методикою неперервної реєстрації кутів дозволяє досягати максимальної швидкості вимірювань, яка може досягати до 500 000 точок за секунду (точок/с). Така швидкість є особливо корисною при скануванні великих об'єктів або територій, де потрібна висока продуктивність для збору великого обсягу даних за короткий проміжок часу.



**Рисунок 5.** Помилки у вимірюванні відстаней, викликані високою розбіжністю лазерного випромінювання [259]

Кутовим кроком сканування називається величина кутового зміщення блоку розгортки для кожного окремого вимірювання. Мінімальний кутовий крок сканування визначає максимально можливу щільність зйомки для конкретної моделі наземного лазерного сканера і залежить від конструктивних особливостей блоку розгортки. Чим менший кутовий крок, тим вищою є точність і щільність зйомки, оскільки це дозволяє отримати більше точок на одиницю площі, що є важливим для детального моделювання об'єктів та точного аналізу їх поверхні.

Кут поля зору наземного лазерного сканера визначає максимальну область, яку можна охопити з однієї сканерної станції без необхідності переміщення чи розвороту самого пристрою. Цей параметр вимірюється в градусах і охоплює горизонтальну та вертикальну площини. Якщо раніше кут поля зору перших моделей НЛС становив лише  $40^\circ$  в обох площинах, то більшість сучасних моделей мають кут поля зору, що наближається до панорамного – до  $360^\circ$  в горизонтальній площині та до  $320^\circ$  у вертикальній. Це значно розширює можливості сканування, дозволяючи отримати більше даних за менший час і без

необхідності додаткових переміщень пристрою, що підвищує ефективність і точність вимірювань.

Наземні лазерні сканери, через особливості своєї конструкції, не мають підвищеної морозостійкості. Більшість моделей працює лише при температурах вище 0° С, що обмежує їх використання в умовах низьких температур, особливо в зимовий період, коли потрібне сканування на відкритому повітрі. Однак останнім часом виробники активно вдосконалюють НЛС, враховуючи збільшення попиту на лазерні сканери та потребу в більш широкому діапазоні експлуатаційних температур.

Сучасні моделі НЛС мають високий рівень пило- та вологозахищеності, що дозволяє працювати в умовах підвищеної запиленості та вологості. Для поліпшення герметичності та виключення контакту з зовнішнім середовищем перевагу отримують сканери з рідинним охолодженням. Класи захисту таких пристроїв визначаються за стандартом ІЕС 60825-1 за індексом ІР, з класами до ІР66, що забезпечує їх надійність і витривалість в екстремальних умовах [260].

Сучасні НЛС можуть працювати при температурах до мінус 40° С, що значно розширює їх застосування в умовах низьких температур.

Щодо безпеки, лазери, що використовуються в НЛС, поділяються на кілька класів відповідно до міжнародного стандарту ІЕС 60825-1, зокрема: клас 1, 1М, 2, 2М, 3R, 4 [260]. Кожен клас визначає рівень безпеки лазерного випромінювання і вимоги до захисту від його впливу на очі та шкіру.

Для приведення результатів вимірювань наземного лазерного сканування до заданої системи координат зазвичай виконується орієнтування за точками з відомими координатами, які називають сканерними марками. Цей метод обумовлений тим, що більшість сучасних НЛС не оснащені пристроями для автоматичного врахування нахилу і розвороту, що могли б забезпечити орієнтування іншим способом.

Однак у останні роки спостерігається тенденція до впровадження традиційних способів орієнтування, подібних до тих, які використовуються в електронних тахеометрах. Для реалізації цього підходу сучасні НЛС обладнують

пристроями, які компенсують кути нахилу приладу або враховують їх у визначеному діапазоні. Завдяки цьому можна більш точно визначити положення сканера і дирекційний кут однієї з осей, що дозволяє привести дані вимірювань до єдиної системи координат.

Впровадження таких технологій значно розширює функціональні можливості НЛС, роблячи процес орієнтування швидшим і точнішим. Зростаюча автоматизація і інтеграція з іншими геодезичними інструментами підвищують ефективність роботи, особливо в складних умовах, де традиційні методи могли бути обмеженими.

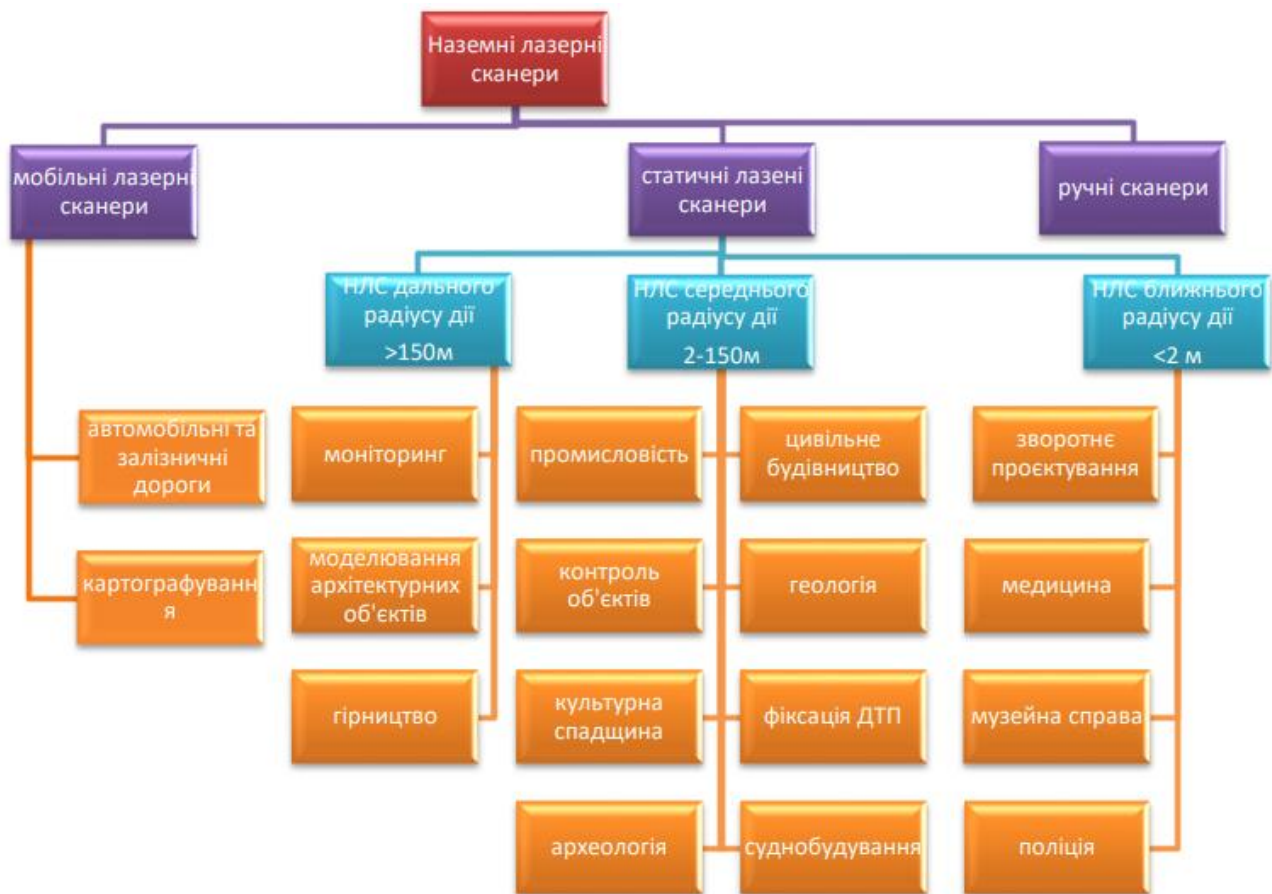
Більшість сучасних моделей топографічних наземних лазерних сканерів здатні працювати як від джерел змінної, так і постійної напруги. Використання змінної напруги є оптимальним у випадках, коли доступна мережа 220 В, що зазвичай характерно для закритих виробничих приміщень чи лабораторій. Це забезпечує стабільне електроживлення і знімає потребу в додаткових джерелах енергії.

На відкритих майданчиках, де доступ до мережі обмежений або взагалі відсутній, живлення НЛС здійснюється за допомогою спеціалізованих або універсальних акумуляторних батарей. Зазвичай ці батареї забезпечують постійну напругу в діапазоні від 12 до 24 В, що достатньо для більшості моделей сканерів. Однак деякі пристрої потребують мінімальну напругу 24 В, що може створювати певні незручності, адже батареї з такими характеристиками мають більшу вагу, що знижує мобільність і зручність транспортування обладнання.

Удосконалення джерел живлення для НЛС є одним із важливих напрямків сучасного розвитку технологій. Виробники зосереджуються на створенні компактних, легких і довговічних акумуляторів, які дозволяють збільшити час автономної роботи та полегшують використання обладнання в польових умовах. Це особливо важливо для тривалих геодезичних робіт або у важкодоступних місцевостях, де кожен грам ваги і кожна година роботи мають вирішальне значення.



Останнім часом на ринку наземних лазерних сканерів спостерігається стрімкий розвиток, зумовлений впровадженням передових технологій і вдосконаленням конструкцій приладів. Виробники зосереджуються на розширенні функціоналу, покращенні точності вимірювань і підвищенні зручності використання. Таким чином, можна використовувати наступну класифікацію наземного лазерного сканування (рисунок 6) [259].



**Рисунок 6.** Класифікація НЛС [259]

*Джерела похибок у результатах наземного лазерного сканування.*

Усі похибки, що виникають при вимірюванні величин за допомогою наземного лазерного сканування, можна поділити на дві основні групи [261]:

– інструментальні, що залежать від якості збирання та налаштування механічних, оптичних і електронних компонентів приладу;



– методичні, які обумовлені особливостями самого методу визначення величин за допомогою НЛС.

Похибки першої групи фіксуються у технічному паспорті сканера, їх первинне визначення відбувається на етапі збирання та налаштування приладу, а подальше – під час періодичної калібровки і метрологічної атестації НЛС. Результати таких досліджень дозволяють оцінити відповідність точності роботи окремих блоків приладу заявленим характеристикам. Усунути інструментальні похибки зазвичай можливо лише шляхом заміни компонентів або зміни технології виготовлення приладу.

Методичні похибки зазвичай можна врахувати під час обробки результатів вимірювань.

Щодо наземного лазерного сканування, методичні похибки поділяються на такі категорії:

– похибки, спричинені умовами навколишнього середовища, зокрема атмосферною рефракцією, затуханням електромагнітних хвиль, вібрацією приладу тощо;

– похибки, пов'язані з характеристиками об'єкта сканування, такими як розмір, орієнтація, колір, текстура тощо.

Для врахування методичних похибок у результатах наземного лазерного сканування використовують два основні підходи:

– окремий аналіз впливу кожного фактору. Цей метод передбачає оцінювання впливу кожної причини похибок окремо. Його застосовують для усунення основної частини систематичних похибок, які виникають під час вимірювання кутів і відстаней сканером. Таке коригування зазвичай здійснюється на етапі попередньої обробки сканів;

– комплексний підхід. Він полягає у врахуванні сукупного впливу всіх факторів, подібно до усунення систематичних похибок у координатах точок під час фотограмметричної обробки знімків. Для цього часто використовуються поліноміальні моделі. Комплексний підхід дозволяє усунути залишкові

систематичні похибки в координатах точок сканів, забезпечуючи універсальність та точність обробки.

Крім того, автоматичне постоброблення, яке часто виконується під час зйомки, наприклад, видалення або фільтрація точок за певними критеріями, також може вплинути на загальну якість хмари точок.

*Технологічний процес наземного лазерного сканування.*

На даний момент не існує запатентованої технології виконання робіт із наземного лазерного сканування для створення тривимірних моделей місцевості та розробки топографічних планів і двовимірних креслень ділянок сканування.

Розглянемо сутність та особливості виконання кожного етапу наземного лазерного сканування [262-266].

На етапі складання технічного проекту визначають необхідну точність побудови тривимірної моделі місцевості (об'єкта) або цифрового плану, їх зміст та деталізацію, необхідний формат (розширення) готової продукції, використовуване обладнання та вартість виконання робіт. У разі потреби уточнюються питання щодо додаткової семантичної інформації для кожного об'єкта.

З урахуванням конкретних умов місцевості вибирається раціональний спосіб створення та згущення зйомочного обґрунтування. Також під час рекогностування визначаються точки розташування сканера, місця для розміщення спеціальних марок, уточнюються строки проведення робіт тощо.

Кількість і розташування сканерних станцій проєктується на основі вимог до забезпечення необхідної точності створення продукції за результатами сканування, продуктивності та економічності робіт. Відстань між сканерними станціями при зйомці об'єктів з метою створення тривимірних моделей, як правило, становить 20-30 м, а в деяких випадках – менше, залежно від складності об'єкта.

Після завершення рекогностування складаються абриси території. Від точності абрисів залежить достовірність подальшого розпізнавання об'єктів зйомки при дешифруванні точкової моделі в камеральних умовах.

При зйомці малозабудованих територій абриси краще складати за точковою моделлю об'єкта (отриманою після наземного лазерного сканування), надрукованою на папері в ортогональній проекції, подібно до того, як проводиться польове дешифрування об'єктів за фотопланами. Такий підхід спрощує процес складання абрисів, оскільки на скані будуть відображені всі об'єкти в єдиному масштабі, і потрібно лише доповнити його семантичною інформацією.

Визначення координат точок планово-висотного обґрунтування необхідне для створення тривимірних моделей і великомасштабних планів місцевості в заданій системі координат і включає наступні етапи:

- складання проєкту мережі основного та робочого планово-висотного обґрунтування;
- закріплення точок основного планово-висотного обґрунтування та проведення польових вимірювань за планово-висотною прив'язкою точок основного обґрунтування;
- камеральна обробка, що включає етапи: зрівнювання результатів польових вимірювань та складання каталогу координат точок основного планово-висотного обґрунтування;
- оцінка точності створення основного зйомочного обґрунтування;
- створення робочого планово-висотного обґрунтування.

Процес виконання тривимірного наземного лазерного сканування передбачає кілька етапів, кожен з яких має важливе значення для досягнення високої точності і якості отриманих даних:

- на першому етапі сканер встановлюється на запроєктованій точці, використовуючи штатив. Висота установки штатива визначається таким чином, щоб забезпечити максимальне охоплення досліджуваної території або об'єкта на одному скані;

– навколо сканера встановлюються спеціальні марки, що служать точками робочого зйомочного обґрунтування (рисунок 7, 8). Вони можуть бути різних типів, залежно від завдань сканування. Плоскі марки зазвичай використовуються для орієнтації сканів щодо зовнішньої системи координат, а об'ємні марки – для точного взаємного орієнтування і з'єднання сканів між собою;



**Рисунок 7.** Плоскі марки зі світловідбивною поверхнею [267]



**Рисунок 8.** Об'ємні марки [267]

– визначення координат центрів спеціальних марок здійснюється з точок основної опорної мережі. Оцінка точності створення робочого обґрунтування може бути виконана шляхом багаторазового вимірювання центрів спеціальних марок або визначення координат тих самих марок з різних пунктів основної зйомочної мережі. Це дозволяє порівняти результати вимірів та оцінити їх точність, використовуючи стандартні методи, аналогічні оцінці точності тахеометричних вимірювань, де враховується похибка, що виникає при зйомці з різних точок;

– зйомка місцевості та об'єктів навколо точки розташування сканера. На цьому етапі проводиться сканування об'єкта, враховуючи як його геометричні особливості, так і особливості навколишнього середовища. Якщо сканер оснащений цифровою камерою, одночасно виконується цифрова зйомка для створення фотограмметричних матеріалів, що забезпечують додаткові дані для подальшої обробки та аналізу;

– переміщення сканера на наступну точку зйомки та повторення вищеописаних етапів забезпечує безперервність процесу сканування, охоплюючи всі необхідні ділянки території. Це дозволяє отримати дані з різних точок зйомки, що необхідні для формування повної та точної 3D-моделі об'єкта або місцевості.

Камеральні роботи та попередня обробка даних наземного лазерного сканування є важливою складовою процесу отримання точних 3D-моделей об'єктів. Первинна обробка отриманих даних, як правило, здійснюються за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення, розробленого виробником сканера. Попередня обробка даних починається з фільтрації точок, яка включає етапи очищення та уточнення інформації. Для цього застосовуються різні типи фільтрів, що допомагають усунути шумові точки, які можуть виникнути через несприятливі умови сканування або обмеження технічних характеристик сканера. Серед найбільш поширених методів – фільтрація для видалення шумів, осереднення даних для зменшення випадкових похибок, а також фільтрація високих та низьких частот, що дозволяє зберегти тільки

значущі дані для подальшої обробки. Фільтрація даних дозволяє значно підвищити якість точкової хмари, зробивши її більш придатною для створення точних 3D-моделей та подальшої аналізу, зменшуючи кількість зайвих або неправильних точок, що можуть спотворювати результати.

Наступним етапом є зовнішнє орієнтування одиночних точкових моделей (сканів), що полягає в приведенні отриманих даних до визначеної системи координат. Оцінка точності зовнішнього орієнтування сканів проводиться за допомогою обчислення середньоквадратичної похибки одиниці ваги. Це дозволяє оцінити точність розміщення сканів у заданій системі координат та визначити, наскільки коректно виконано їх орієнтування. Похибка оцінюється з використанням алгоритмів, що реалізовані в програмному забезпеченні, яке використовується для обробки даних лазерного сканування. Середньоквадратична помилка дає змогу виявити можливі спотворення або неточності при поєднанні точок із різних сканів, що є важливим для подальшої побудови точних тривимірних моделей.

Експорт зовнішньо орієнтованих сканів є важливим етапом для подальшої роботи з даними, оскільки багато програмних продуктів для обробки сканів використовують власні формати файлів, що можуть відрізнятися від стандартів, які застосовуються у програмному забезпеченні для управління сканером. Тому необхідно виконати експорт даних з програми, що контролює процес сканування, у відповідний формат для подальшого використання. В результаті цього процесу створюється файл, що містить єдину точкову модель, яка об'єднує всі скани в одну цілісну структуру, готову до подальшого аналізу та обробки в іншому програмному середовищі.

Основна частина камеральних робіт у технології створення тривимірних моделей місцевості на основі даних наземного лазерного сканування полягає у побудові векторних моделей об'єктів ситуації.

Для створення тривимірних векторних моделей об'єктів ситуації застосовуються такі режими:

– автоматичний – використовується для моделювання об'єктів правильної геометричної форми, таких як будівельні елементи стандартної форми. У цьому режимі процес векторизації значно прискорюється завдяки алгоритмам, які автоматично розпізнають та перетворюють точкові дані у векторні елементи;

– напівавтоматичний – використовується для об'єктів зі складною, але все ж достатньо визначеною формою. Тут векторизація частково автоматизована, але потребує певного втручання оператора для коректного визначення контурів та уточнення деталей;

– інтерактивний – застосовується для об'єктів неправильної або дуже складної геометрії, а також для малих об'єктів, де автоматичні алгоритми можуть не справитися з точністю. В цьому режимі оператор активно взаємодіє з моделлю, коригуючи контури вручну.

Для створення цифрової моделі рельєфу (ЦМР) на основі даних наземного лазерного сканування розроблена наступна методика:

– на першому етапі в інтерактивному режимі видаляються точки, які належать об'єктам, таким як дерева, високі конструкції (опори ЛЕП, будівлі, труби, цистерни тощо). Це робиться для зменшення складності точкової моделі, що полегшує подальшу обробку даних за допомогою автоматичних фільтрів;

– застосовується топографічний фільтр для відокремлення точок, що не відносяться до земної поверхні. Для досягнення бажаного результату необхідно кілька разів використовувати цей фільтр, поступово збільшуючи розмір оброблюваної ділянки. Це дозволяє поліпшити точність і детальність моделі;

– для моделювання рельєфу застосовується метод TIN (Triangulated Irregular Network), що представляє поверхню як нерегулярну мережу трикутників.

Для остаточного оформлення топографічного плану доцільніше використовувати системи автоматизованого проєктування або геоінформаційні системи.

*Програмне забезпечення для обробки даних наземного лазерного сканування.*

Усі виробники НЛС пропонують своє програмне забезпечення для управління сканером та обробки результатів сканування. Більшість таких програмних продуктів дозволяє вирішувати прикладні завдання в різних галузях.

Програмне забезпечення, яке використовується в технології лазерного сканування, залежно від його функціонального призначення, можна поділити на кілька груп (таблиця 2).

Сучасні розробники програмного забезпечення для наземного лазерного сканування орієнтуються на створення комплексних платформ, які забезпечують інтегроване вирішення кількох завдань. Такі програмні продукти не лише ефективно керують лазерними сканерами та обробляють отримані дані, але й включають функції, притаманні системам автоматизованого проектування. Це дозволяє значно розширити можливості використання таких платформ у різних галузях, наприклад [268]:

- проведення порівняння реальної моделі з проектною, що дає змогу оцінити відповідність виконаного сканування заданим параметрам і виявити розбіжності. Цей процес включає в себе візуалізацію графічних відомостей, що дають чітке уявлення про відхилення, що виникають під час будівництва або реконструкції об'єктів;

- редагування тривимірних векторних моделей, що дає змогу коригувати структуру та геометрію моделей на основі нових вимірів або уточнень. Це дозволяє створювати детальні та точні 3D-моделі, що відповідають реальному стану об'єктів;

- створення моделей у вигляді Solid-геометрії (твердих тривимірних тіл), що є важливим кроком у розвитку проектування, адже такі моделі є набагато більш точними, ніж традиційні моделі, побудовані з набору полігонів або структурних ліній. Це дозволяє здійснювати аналіз об'ємів, інтерференцій і навіть симуляції взаємодії об'єктів у тривимірному просторі, що надзвичайно важливо для розробки складних інженерних проєктів.



Таблиця 2.

Класифікація ПЗ за функціональним призначенням [268]

Програмне забезпечення	Призначення програмного забезпечення
Керуюче програмне забезпечення	<ul style="list-style-type: none"> <li>– управління сканером для задання роздільної здатності сканування, секторів сканування шляхом візуального вибору об'єктів, режиму сканування, режиму роботи цифрової камери;</li> <li>– візуалізація сканів у режимі реального часу;</li> <li>– контроль отриманих результатів;</li> <li>– налаштування та калібрування сканера;</li> <li>– тестування сканера, виявлення можливих несправностей;</li> <li>– врахування помилок, пов'язаних з впливом зовнішніх умов навколишнього середовища;</li> <li>– об'єднання сканів;</li> <li>– зовнішнє орієнтування сканів;</li> <li>– експорт результатів сканування.</li> </ul>
Програмне забезпечення для створення єдиної точкової моделі	<ul style="list-style-type: none"> <li>– об'єднання сканів;</li> <li>– зовнішнє орієнтування сканів;</li> <li>– редагування точкової моделі: сегментування та розрідження;</li> <li>– візуалізація точкової моделі;</li> <li>– експорт та друк.</li> </ul>
Програмне забезпечення для побудови тривимірних моделей і двовимірних креслень за даними сканування	<ul style="list-style-type: none"> <li>– створення нерегулярної трикутної мережі (TIN) і NURBS-поверхні за масивом точок;</li> <li>– редагування TIN;</li> <li>– створення моделі об'єкта за допомогою геометричних примітивів;</li> <li>– профілювання;</li> <li>– побудова креслень;</li> <li>– проведення вимірювань (довжин, діаметрів, площ, об'ємів об'єктів);</li> <li>– візуалізація побудованої моделі;</li> <li>– автоматизовані механізми створення креслень;</li> <li>– побудова ізоліній;</li> <li>– можливість порівняння побудованої моделі з проектною;</li> <li>– текстурування тривимірної моделі;</li> <li>– експорт та виведення на друк результатів обробки даних НЛС.</li> </ul>
Комплексне програмне забезпечення	<ul style="list-style-type: none"> <li>– всі функції керуючого програмного забезпечення;</li> <li>– створення точкової моделі;</li> <li>– побудова тривимірних моделей і двовимірних креслень за даними наземного лазерного сканування.</li> </ul>

Цей підхід не лише підвищує точність і ефективність обробки даних, але й дозволяє інтегрувати сканування в більш широкий процес проектування, що включає аналіз, моделювання та візуалізацію результатів.

*Області застосування даних наземного лазерного сканування.*

Наземне лазерне сканування має широкий спектр застосувань у різних галузях, що підкреслює його універсальність та ефективність у вирішенні складних задач [262-264, 266, 269]:

– картографування місцевості. НЛС забезпечує високу точність і продуктивність у створенні цифрових карт. Воно ефективне як для мало забудованих територій, так і для зон із великою щільністю об'єктів, проте менш придатне для ділянок із густою рослинністю;

– документування архітектурних пам'яток. Технологія НЛС використовується для сканування складних форм і деталей об'єктів культурної спадщини, що сприяє їхньому збереженню та реконструкції;

– нафтогазова промисловість. НЛС ефективне для моделювання об'єктів із високою щільністю трубопроводів, кабелів та резервуарів, забезпечуючи швидкість і точність, необхідні для аналізу складної інфраструктури;

– медицина. Тривимірне сканування тіла дозволяє створювати точні моделі для виготовлення ортопедичних пристроїв, таких як протези та корсети, із максимальною індивідуалізацією;

– будівництво та інженерія. НЛС застосовують для моніторингу будівель, виявлення деформацій, створення детальних моделей для реконструкції або проектування нових об'єктів;

– гірничча промисловість. Технологія використовується для сканування кар'єрів, тунелів та інших гірничих об'єктів, що дозволяє швидко створювати тривимірні моделі для аналізу стабільності конструкцій або оцінки обсягів видобутих матеріалів;

– транспортна інфраструктура. Наземні лазерні сканери активно застосовуються для оцінки стану доріг, мостів та залізничних шляхів. Це

допомагає ідентифікувати дефекти покриття, оцінити геометрію та забезпечити якісний моніторинг стану об'єктів;

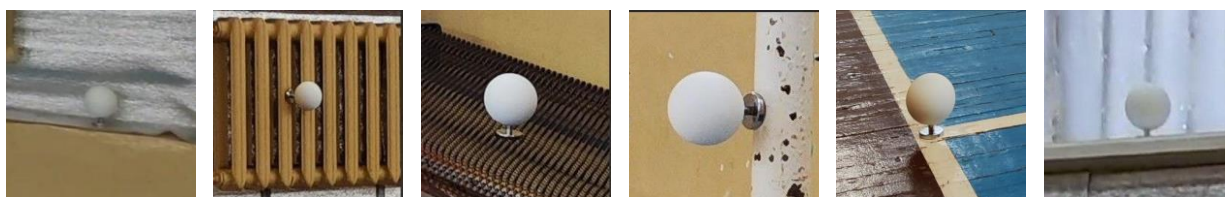
– енергетика. Сканування електростанцій, ліній електропередач і підстанцій дозволяє оцінити стан обладнання, проводити регулярний моніторинг і планувати ремонтні роботи;

– кіноіндустрія та віртуальна реальність. НЛС використовується для створення цифрових моделей реальних об'єктів у віртуальних середовищах, що робить його незамінним інструментом для фільмів, ігор і симуляторів;

– агроіндустрія. Сканування сільськогосподарських територій для моніторингу рельєфу, іригаційних систем і земельних ресурсів.

*Практична реалізація: особливості лазерного 3D-сканування  
з використанням об'ємних марок*

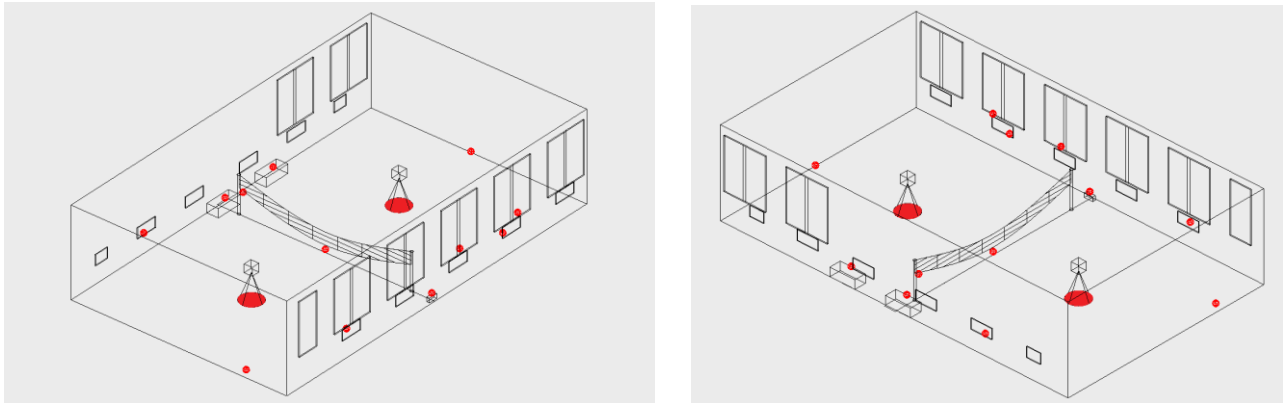
Об'ємні марки слугують з'єднувальними точками, які забезпечують точність і надійність поєднання сканів з різних станцій. У дослідженні, проведеному в закритому спортивному приміщенні, сфери розміщували на різних висотах і поверхнях для перевірки їх ефективності за різних умов освітлення і кутів відбиття лазера (рисунок 9, 10). Зйомка проводилась лазерним сканером Trimble TX6, який відомий своєю здатністю автоматично визначати такі марки в хмарі точок [270].



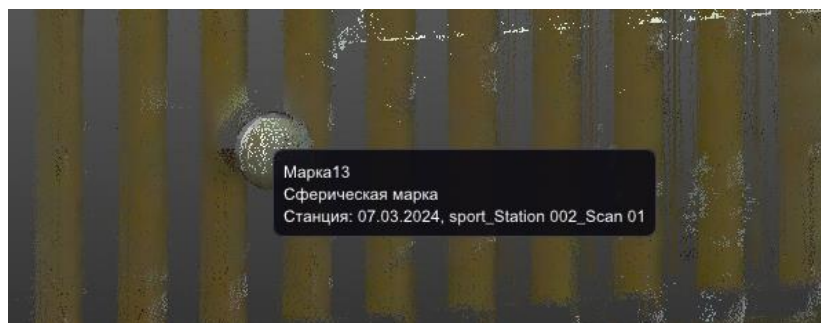
**Рисунок 9.** Приклади розміщення об'ємних марок [270]

Під час експерименту було проведено сканування з двох станцій на третьому рівні точності, що дозволило отримати понад 555 мільйонів точок зі станції. Програмне забезпечення Trimble RealWorks автоматично розпізнавало об'ємні марки (рисунок 11), зшивало результати сканування, а також надавало

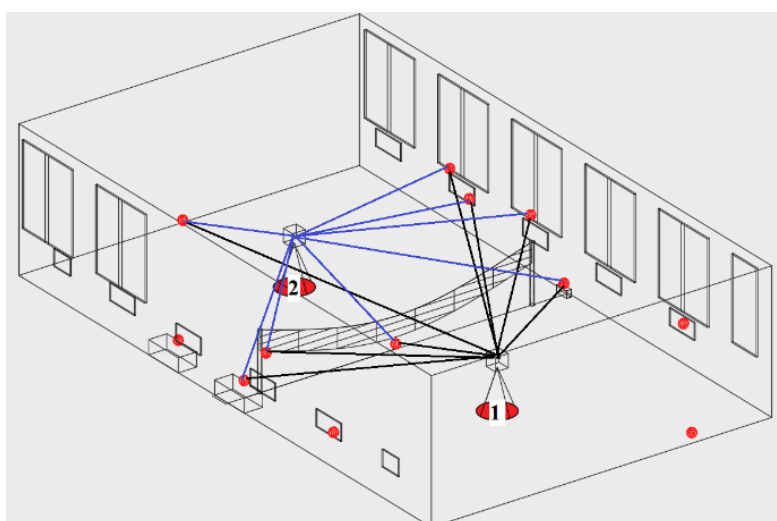
можливість редагувати та аналізувати отримані дані. Для зшивання було обрано 8 з 12 марок, які забезпечили точне поєднання сканів (рисунок 12). Решта марок, через перешкоди у вигляді волейбольної сітки, були ідентифіковані лише з одного боку.



**Рисунок 10.** Схема розташування магнітних сфер [270]

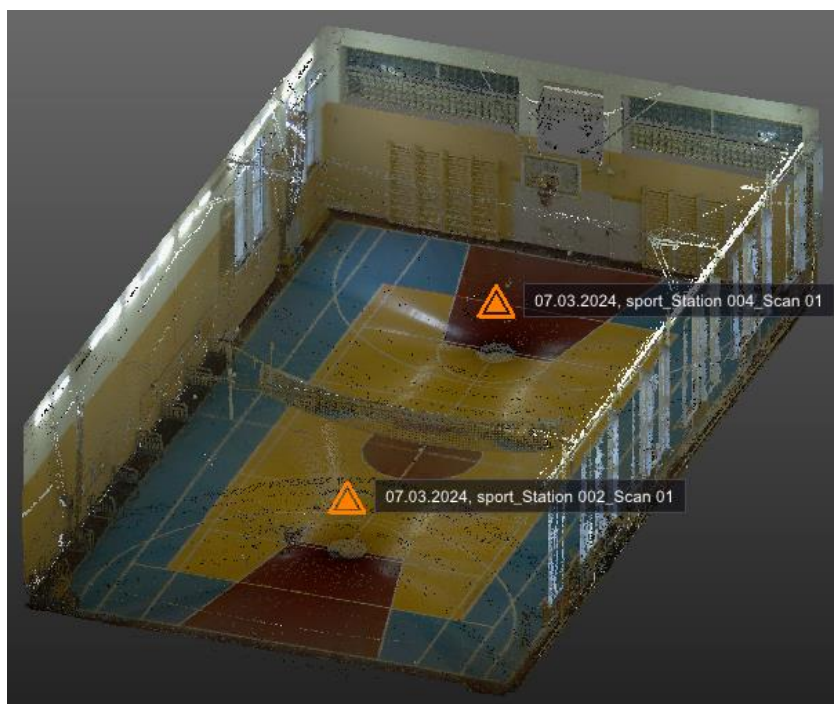


**Рисунок 11.** Виявлена марка з автоматичним призначенням номера [270]



**Рисунок 12.** Схема зшивання за марками [270]

Однак під час зшивання хмари точок виникли труднощі, пов'язані з паралаксом на краях і неправильною реєстрацією деяких точок. Це вимагало додаткового часу для ручного очищення даних. Незважаючи на це, зшита хмара точок забезпечила достатню деталізацію для подальшого аналізу об'єкта (рисунок 13).



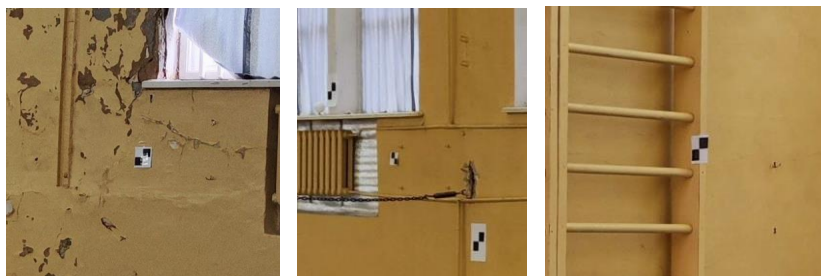
**Рисунок 13.** Зшита хмара точок закритого приміщення [270]

*Практична реалізація: особливості лазерного 3D-сканування  
з використанням плоских марок*

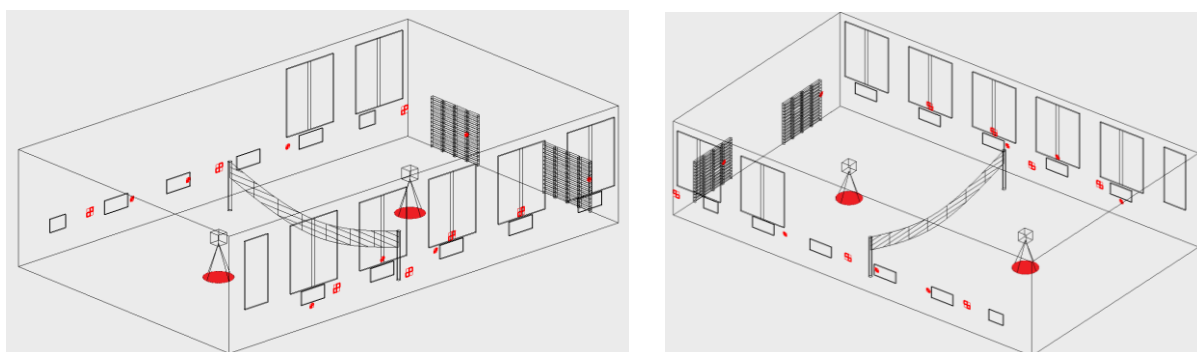
Особливу увагу слід приділити складній геометрії об'єктів. Відображення об'єктів із нетиповими формами або значною протяжністю вимагає точності та збереження коректної геометрії під час об'єднання даних із кількох сканувальних станцій. У цьому процесі важливу роль відіграють плоскі марки, які мають перевагу тривалого використання, що спрощує подальші зйомки або корекцію даних [271].

Плоскі марки, представлені у вигляді простих геометричних примітивів, мають низку характеристик, серед яких вектор нормалі, відстань до початку координат і довжина нормалі, що визначається математично.

Експеримент проведено в закритому спортивному приміщенні площею  $25 \times 15$  м. На різних поверхнях приміщення були встановлені плоскі марки розмірами  $10 \times 10$  см та  $15 \times 15$  см, які слугували референсними точками для лазерного сканера Trimble TX6 (рисунок 14, 15). Обробка даних виконувалася в програмному забезпеченні Trimble RealWorks.



**Рисунок 14.** Приклади розміщення плоских марок [271]



**Рисунок 15.** Схема розташування плоских марок [271]

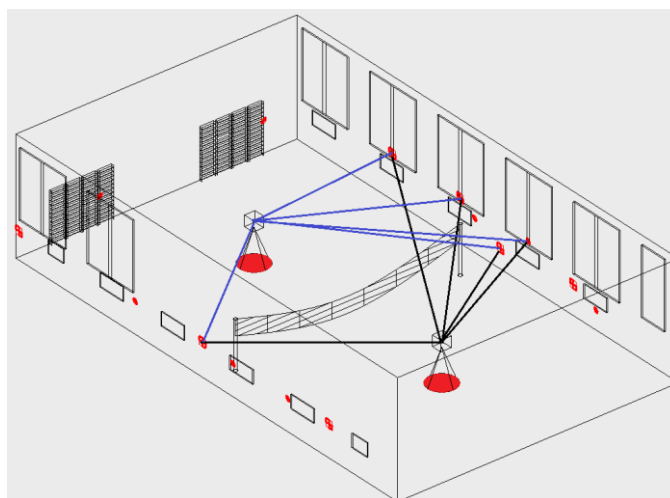
Результати сканування показали, що більші марки були ефективнішими для забезпечення точності зшивання. Водночас на нерівностях поверхонь програма іноді розпізнавала фонові елементи як додаткові марки, що потребувало детальної перевірки (рисунок 16).

Для зшивання було виконано прив'язку сканів з двох станцій шляхом розпізнавання 5-ти плоских марок з 10-ти. Марки з 6-го по 10-ий номер теж були розпізнані сканером, але тільки з одного боку. Ще 5 марок не були розпізнані взагалі (рисунок 17).





**Рисунок 16.** Неіснуючі плоскі марки [271]



**Рисунок 17.** Схема зшивання за марками [271]

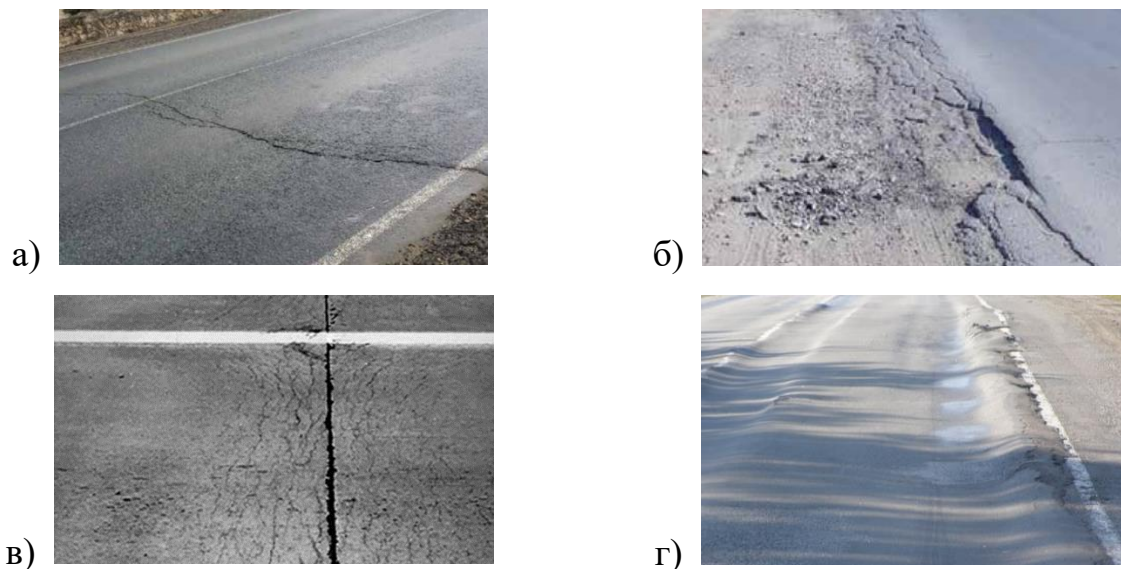
Зшита хмара точок наведена на рисунку 13.

*Практична реалізація: технологія наземного лазерного 3D-сканування для оцінки стану дорожнього покриття.*

Дослідження у сфері моніторингу дорожнього покриття підкреслюють важливість точного отримання інформації для оптимального управління інфраструктурою. Лазерне 3D-сканування визнане одним із найточніших способів створення моделей дорожнього покриття, що дозволяє фіксувати дрібні дефекти. У той же час, інтеграція цієї технології у дорожню галузь України перебуває на початкових етапах і потребує адаптації нормативної бази [272].

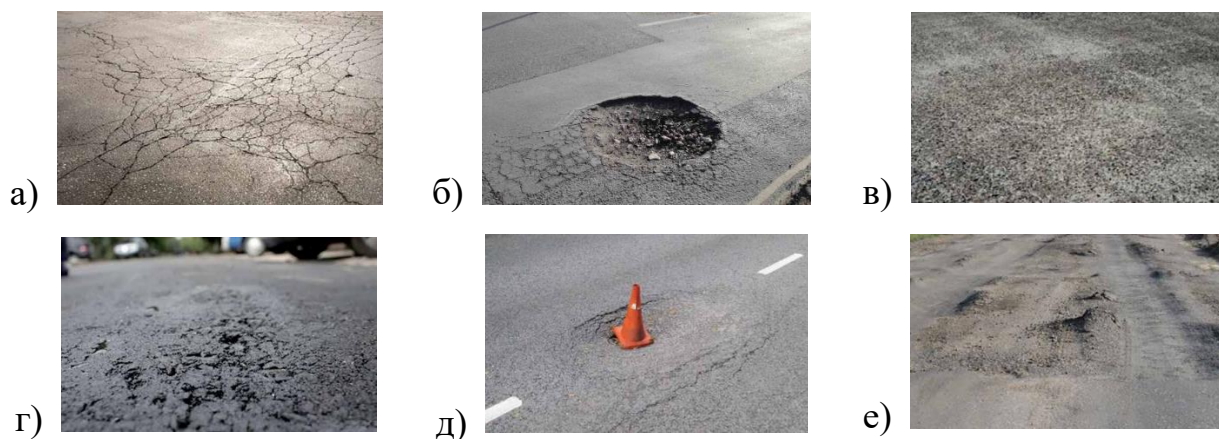
За допомогою лазерного 3D-сканування можна ідентифікувати основні види дефектів, серед яких (рисунок 18, 19):

- лінійні дефекти: тріщини, руйнування крайки дорожнього одягу, колійність;
- площинні дефекти: вибоїни, сітки тріщин, просідання.



а) – поперечні тріщини; б) – руйнування крайки дорожнього одягу;  
в) – руйнування деформаційних швів; г) – колійність.

**Рисунок 18.** Лінійні дефекти [273]



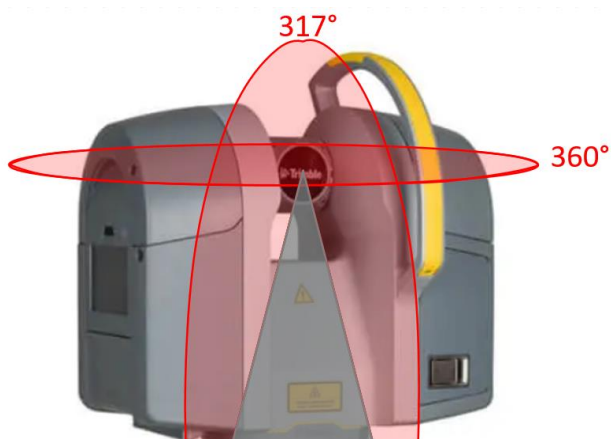
а) – сітка тріщин; б) – вибоїна; в) – викришування;  
г) – лущення; д) – просідання; е) – проломи

**Рисунок 19.** Площинні дефекти [273]

Оптимальними характеристиками сканера для дорожнього моніторингу є точність до 2 мм, радіус дії до 100 м та широкий кут поля зору. Наприклад,



Trimble TX6 відповідає цим вимогам (рисунок 20), забезпечуючи високу деталізацію і стабільність у діапазоні температур від 0 до 40 °С. Підготовка до роботи включає перевірку обладнання, налаштування параметрів (рисунок 21) та врахування особливостей місцевості.

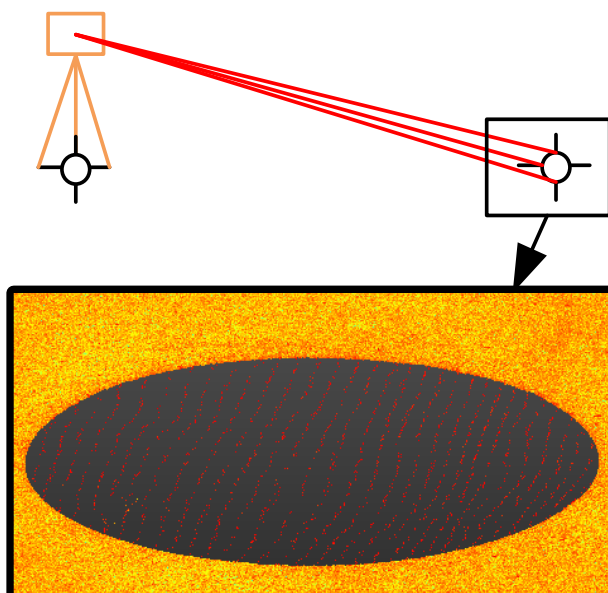


**Рисунок 20.** Поле зору сканера Trimble TX6



**Рисунок 21.** Мінімальна висота триноги  
для оцінки стану дорожнього покриття

Правильне розташування станцій мінімізує ризик утворення «мертвих зон» (рисунок 22). Для невеликих ділянок (~150 м) достатньо 4-7 станцій, для довгих (до 1 км) – до 25 станцій. У складних умовах, таких як транспортні розв'язки, сканування повинно виконуватись з обох рівнів конструкції.



**Рисунок 22.** Результати сканування у «мертвій зоні» з суміжної станції

Після збору даних здійснюється їх очищення, фільтрація та об'єднання в єдину тривимірну модель. Цей етап є критично важливим для якісного аналізу дефектів і формування звітності.

*Практична реалізація: технологія обробки даних лазерного 3D-сканування*

Застосування сучасних лазерних 3D-сканерів суттєво пришвидшує польові роботи, оскільки більшість завдань з обробки даних переміщається на камеральний етап. Під час польової зйомки збирається велика кількість даних, які потребують подальшої систематизації, фільтрації та побудови інтегрованих цифрових моделей. Це піднімає питання вибору відповідного програмного забезпечення для роботи з великими обсягами інформації, оскільки від цього залежить точність і ефективність подальшої обробки даних.

Існує багато методів обробки хмар точок, що активно розробляються для аналізу топографічних об'єктів. Одним з основних підходів є метод визначення середньої лінії об'єктів, що дозволяє створювати згладжені просторові лінії, мінімізуючи відхилення траєкторії та забезпечуючи точне моделювання.

Алгоритми машинного навчання відіграють ключову роль у точному та швидкому розпізнаванні структурних елементів, навіть в умовах складної геометрії, що дає змогу підвищити ефективність аналізу. Для створення детальних профілів місцевості застосовуються методи інтерполяції хмар точок, що дозволяють точно відтворити геометрію поверхні, враховуючи усі її особливості.

Виявлення дефектів або аномалій здійснюється шляхом аналізу текстур та застосування алгоритмів фільтрації та згладжування, що дозволяє зменшити шум і підвищити точність результатів. Крім того, важливою є класифікація хмар точок для автоматизованого розпізнавання об'єктів, таких як дорожні знаки, розмітка чи інші елементи інфраструктури.

Для складних моделей, які потребують більш детального аналізу, застосовуються методи параметричної ідентифікації, що включають визначення нормалей до точок поверхні, що сприяє покращенню точності топографічного аналізу та моделювання об'єктів. Такий підхід дозволяє отримувати високоточні 3D-моделі для різноманітних цілей, від інженерних розрахунків до ландшафтного дизайну [274-278].

У програмному забезпеченні Trimble RealWorks впроваджені автоматизовані алгоритми, що спрощують процес об'єднання хмар точок. Спочатку імпортуються дані, отримані під час сканування, після чого застосовуються алгоритми автоматичного зшивання, які визначають спільні точки і поверхні між сканами для їх точного з'єднання (рисунки 23).

Для початкового етапу обробки даних важливо здійснити автоматичну класифікацію об'єктів на зйомці, що дозволяє ефективно структурувати хмару точок та виділити елементи для подальшого аналізу. В залежності від типу середовища (відкрите або закрите), застосовуються різні класифікації.

Наприклад, при обробці хмар точок для відкритих територій, інструменти Trimble RealWorks дозволяють автоматично класифікувати дані за наступними категоріями (рисунки 24):

– «Ground» (поверхня землі);

- «Building» (будівлі);
- «Poles and Signs» (стовпи та знаки);
- «Power Lines» (лінії електропередач);
- «High Vegetation» (висока рослинність);
- «Remaining» (залишкові об'єкти).

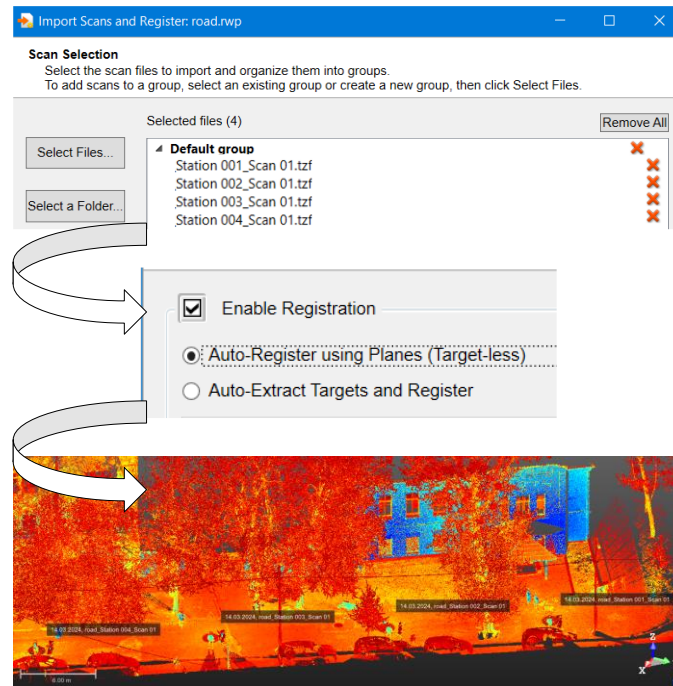
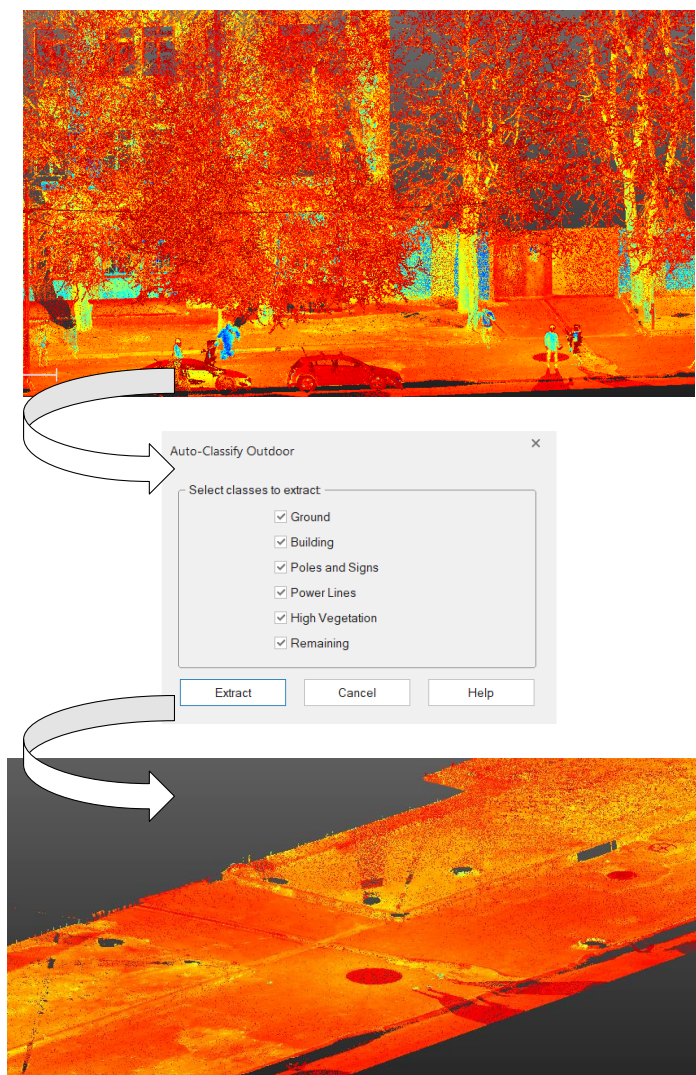


Рисунок 23. Етапи автоматизованого процесу «зшивки» хмар точок у програмному забезпеченні Trimble RealWorks

Це дає змогу зосередити увагу на певних елементах, наприклад, дорожньому покритву, знижуючи навантаження на комп'ютерні системи при обробці великих обсягів даних. Крім того, фільтрація точок за різними параметрами дозволяє підвищити ефективність обробки та точність результатів.

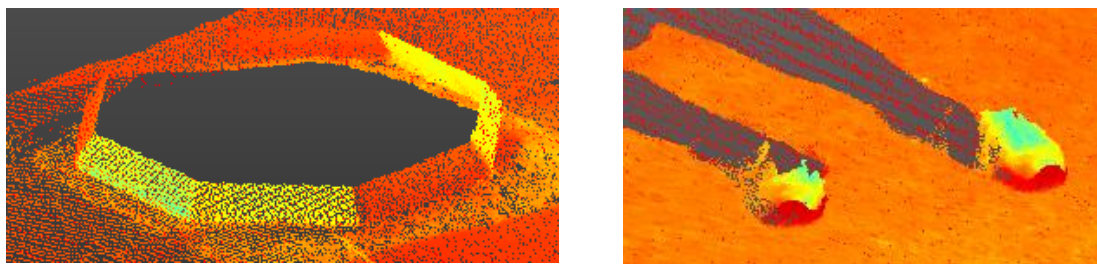
Окрім зазначених класифікацій, існують й інші специфічні категорії, що використовуються залежно від конкретної задачі. Ця гнучкість класифікації дозволяє застосовувати технології лазерного сканування для різноманітних типів об'єктів та умов, забезпечуючи точне та ефективне моделювання.



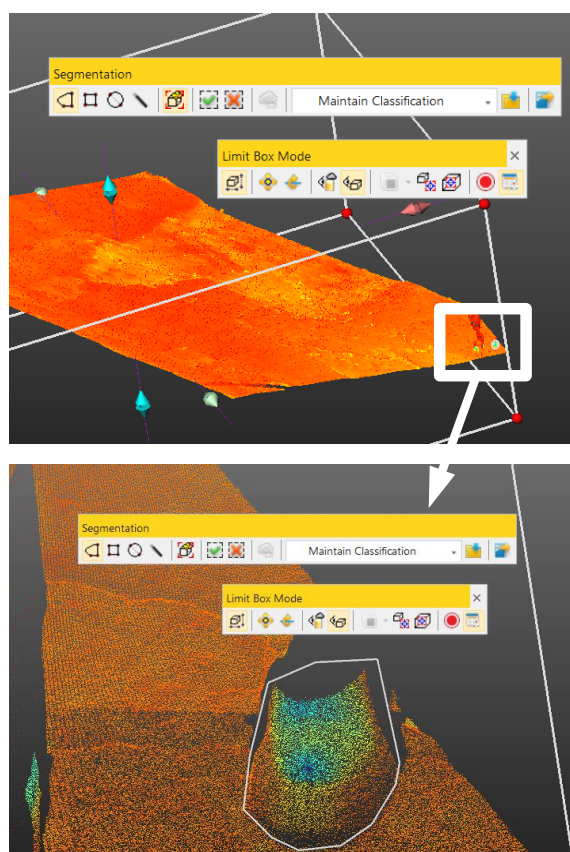
**Рисунок 24.** Результат автоматичної класифікації об'єктів на вулиці в Trimble RealWorks із вибраним класом «Ground»

Процес очищення даних включає видалення зайвих точок, які можуть вплинути на точність аналізу (рисунок 25). Для цього застосовують сегментацію, що дозволяє вручну перевірити та усунути небажані елементи (рисунок 26). Алгоритми машинного навчання демонструють високу точність, але можуть потребувати ручного коригування через залишкові помилки, такі як неправильно класифіковані об'єкти.





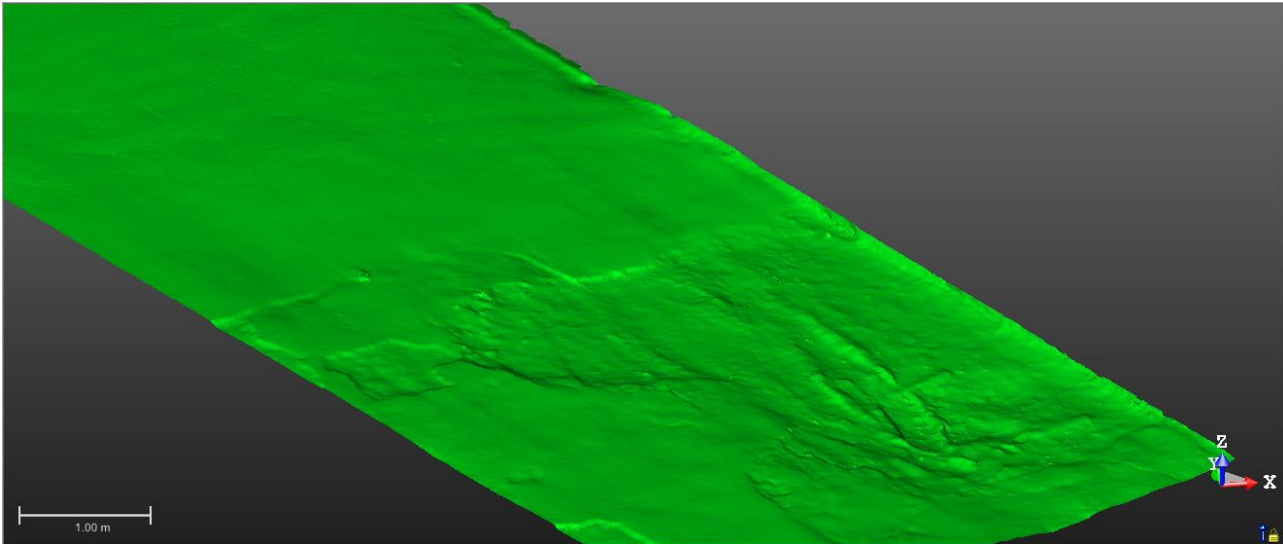
**Рисунок 25.** Приклад об'єктів, які потребують ручного видалення після автокласифікації для забезпечення коректності моделі



**Рисунок 26.** Процес ручного видалення точок з використанням інструменту обмеження області для запобігання втрати інформації

Після очищення хмари точок наступним етапом є створення Mesh-моделі (рисунок 27), яка є тривимірним відображенням геометрії ділянки. Ця модель створюється шляхом з'єднання точок хмари між собою, формуючи трикутну сітку, що відображає поверхню з високою точністю. Mesh-модель дозволяє візуалізувати деталі об'єкта, а також використовувати її для подальших аналітичних процедур, таких як розрахунок об'ємів, аналіз деформацій,

перевірка відповідності проектним вимогам чи оцінка стану поверхні. Така модель може бути інтегрована в різні програмні комплекси для здійснення точних вимірювань і моделювання, що робить її незамінною для геодезичних та будівельних робіт.



**Рисунок 27.** Триангуляційна модель для проведення оцінки стану дорожнього покриття

*Висновки.* Виходячи з досвіду застосування наземних лазерних сканувальних систем для вирішення прикладних завдань у різних галузях народного господарства, можна сміливо стверджувати про впевнене впровадження цієї технології в повсякденну практику. Концепція повної автоматизації збору просторових даних про об'єкти місцевості за допомогою лазерної локалізації дозволяє вирішити дві основні проблеми будь-якого виробництва:

- підвищення продуктивності робіт;
- поліпшення якості та надійності отриманої продукції.

Фактично точність визначення координат точок місцевості за допомогою наземних лазерних сканерів залежить в основному від характеристик приладу, тобто виключається низка помилок при наведенні на марку, нумерації пікетів тощо. Підвищення надійності результатів сканування зумовлене, перш за все, зменшенням впливу людського фактору при роботі з приладом. При камеральній

обробці матеріалів польових сканувальних зйомок все ще значну роль відіграє досвід оператора в інтерпретації великого обсягу даних лазерного сканування, і проблема автоматизації обробки цих даних стає головною. Однак у цьому напрямі активно розробляються алгоритми та програмні продукти, що дозволяють спростити та автоматизувати роботу камеральника.

Швидкому впровадженню технології наземного лазерного сканування в виробництво сприяла тенденція переходу від класичної двовимірної картографії та проєктування до тривимірного опису об'єктів реального світу. Переваги тривимірних моделей за їх інформативністю та наочністю безперечні в порівнянні з традиційними двовимірними планами, картами та кресленнями. За останні два десятиріччя технологія опису об'єктів реального світу за допомогою тривимірного комп'ютерного моделювання перетворилася з фантастики на реальність. Однак, якщо розглядати глобальний перехід від традиційних карт і ГІС до тривимірних, слід ще вирішити низку важливих проблем, пов'язаних з зберіганням і організацією даних, стандартизацією форматів, розробкою принципово нових методів аналізу даних, оскільки кількість топологічних зв'язків у тривимірному світі як мінімум на порядок більша. Попри ці проблеми, вже сьогодні є ряд практично реалізованих проєктів з тривимірного моделювання окремих об'єктів та цілих територій для вирішення конкретних завдань. Наприклад, у умовах зростання вартості земельних ресурсів у деяких країнах впроваджуються системи тривимірного кадастру об'єктів нерухомості, що дозволяють при реєстрації враховувати обсяг використовуваного простору, а не площу земельної ділянки.

Таким чином, наземні лазерні сканери є новим вимірювальним інструментом, що робить реальним і звичайним отримання тривимірних моделей різного призначення.

Це дозволяє стверджувати, що найближчим часом технологія наземного лазерного сканування, якщо не повністю витіснить інші методи, то, принаймні, займе провідну позицію в галузі польового збору метричної інформації для тривимірного моделювання об'єктів і територій.



**SECTION 8. INFORMATICS AND CYBERNETICS**

DOI: 10.46299/ISG.2024.MONO.TECH.4.8.1

**8.1 Проектування та дослідження інтелектуальної системи виявлення та класифікації рухомих об'єктів у відеопотоці**

**Вступ.** Виявлення об'єктів у відеопотоці -одна з найбільш фундаментальних і складних задач по виявленню об'єктів на зображеннях і відео. У минулому велику увагу приділяли проведенню додаткових досліджень щодо задач комп'ютерного зору, таких як класифікація об'єктів, підрахунок об'єктів та моніторинг об'єктів.

У реальному середовищі присутні різні типи об'єктів. Ідентифікація цих об'єктів за допомогою машинного навчання є складним завданням. Комп'ютерне бачення - це розділ інформатики, який дозволяє машині бачити, ідентифікувати та обробляти об'єкти на нерухомих зображеннях та відеозаписах у візуальному світі. Відео - це послідовність безперервних зображень (так званих відеокадрів), що відображаються з певною частотою кадрів. Люди негайно виявляють або розпізнають об'єкти за зображеннями або відео і визначають їх місце розташування завдяки взаємозв'язку нейронів мозку. Виявлення об'єктів на відео - це завдання штучного інтелекту, яке використовується для того самого процесу виявлення об'єктів.

Виявлення об'єктів є фундаментальним, і давня проблема комп'ютерного зору була основною активною сферою досліджень протягом декількох десятиліть [279-288]. Різні методи виявлення об'єктів використовувалися у різних додатках комп'ютерного зору, таких як розпізнавання осіб, підрахунок пішоходів, системи безпеки, виявлення транспортних засобів, самокеровані автомобілі і т.ін. деякі терміни комп'ютерного зору, такі як локалізація, класифікація і розпізнавання об'єктів, пов'язані з обробкою виявлення об'єктів.

Класифікація об'єктів визначає клас одного або декількох об'єктів, що існують на зображенні, і присвоює об'єктам мітки [280]. Локалізація об'єкта - це

процес, який визначає положення одного або декількох об'єктів на зображенні або відео за допомогою обмежувальної рамки [281].

Поєднання процесу локалізації об'єкта та класифікації відоме як виявлення об'єкта [282]. Повний процес розпізнавання об'єктів приймає зображення в якості вхідних даних, ідентифікує об'єкти, присвоює мітки об'єкту відповідного класу і видає ймовірність класу розпізнаного об'єкта [283, 284]. Кожен об'єкт має унікальні ознаки, які допомагають ідентифікувати клас.

Наприклад, квадрат з усіма рівними сторонами допомагає виявити об'єкт квадратного розміру. Велика частина дослідницької роботи з виявлення об'єктів поділяється на три категорії: виявлення помітних об'єктів, виявлення предметності та виявлення об'єктів, специфічних для конкретної категорії. Основною метою виявлення та класифікації об'єктів є ідентифікація категорій об'єктів за зображеннями, і вона має справу з міжкласовими та внутрішньокласовими варіаціями та подібністю [285].

**Метою даної роботи** є підвищення швидкості і точності розпізнавання об'єктів у відеопотоці за рахунок дослідження, проектування і розробки програмних компонентів для підсистеми виявлення та класифікації об'єктів у відеопотоці.

**Основна частина.** Комп'ютерний зір та штучний інтелект мають підмножину, відому як виявлення об'єктів. Де його метою є розробка моделі машинного навчання, здатної виявляти певні об'єкти на зображенні [279, 280]. Саме виявлення об'єктів можна розглядати як одне з фундаментальних понять, що використовуються у багатьох реальних програмах машинного навчання, таких як розпізнавання зображень, розпізнавання обличчя та багато інших [279, 281]. Для того щоб модель машинного навчання розпізнавала об'єкти, їй повинен бути наданий величезний обсяг даних у вигляді зображень, що містять вибрані об'єкти, які модель повинна виявити [282]. Конкретні об'єкти на зображенні, яких вона ніколи раніше не бачила [281, 283].

Об'єкти інформативної області, присутні на зображенні, можуть відрізнитися за розміром і співвідношенням сторін. Модель виявлення об'єктів

сканує все зображення в різних масштабах, щоб виявити об'єкти і знайти впізнаваний візерунок. Можливі положення об'єктів можна визначити за допомогою цієї стратегії, але є деякі недоліки. Ця стратегія є дорогою, оскільки під час обробки створюється кілька вікон-кандидатів, що вимагає високої обчислювальної потужності. Незважаючи на це, якщо в цьому методі застосовується фіксована кількість розсувних вікон, то можуть вийти задовільні області.

Виділення ознак ознаки є особливо важливим параметром зображення, яке використовувалося для класифікації та розпізнавання об'єктів. На першому етапі розпізнається шаблон, а потім цей шаблон надалі використовується для вилучення відмінних ознак, пов'язаних з об'єктом.

Для вилучення ознак використовуються різні методи, такі як HOG, SIFT та Naag. Однак розробка хорошого та надійного описувача функцій є складним завданням через великі проблеми виявлення об'єктів на рівні вулиці є одним з варіантів використання виявлення об'єктів. В основному використовується в самокерованих автомобілях, безпілотних літальних апаратах та камерах спостереження. Виявляючи ці об'єкти, можна зменшити кількість нещасних випадків, таких як автокатастрофи, зіткнення та багато іншого. Це також дозволяє органам влади відстежувати можливі порушення щодо безпеки дорожнього руху.

Класифікація використовується для прогнозування класу за заданими точками даних. У цьому процесі відповідні ознаки об'єднуються для представлення об'єкта порівняно з навченою моделлю. Візуальне розпізнавання вимагає класифікації, щоб відрізнити цільовий об'єкт від інших об'єктів, роблячи представлення об'єкта більш семантичним та інформативним. SVM, DPM, AdaBoost і т.ін. зазвичай використовуються для класифікації.

Зі зростанням технічного розвитку біометрія стає важливою для розпізнавання особистості людини в цілях безпеки. Біометрична аутентифікація є більш надійним методом ідентифікації особи. Аутентифікація здійснюється на основі різних біологічних особливостей кожної людини, таких як відбитки

пальців, ДНК, сітківка ока, вухо і т.ін. Існують різні типи методів виявлення об'єктів, які використовувалися для біометричного аналізу в минулих дослідницьких роботах.

Більшість житлових зон (метро, парки, школи, торгові центри і т.ін.) контролюються різними технічними засобами відеоспостереження, оскільки люди не можуть постійно відстежувати відеокліпи. Виявлення об'єктів відіграє важливу роль в відеоспостереженні, дозволяючи відразу ідентифікувати і відстежувати екземпляри конкретного об'єкта на місці події, наприклад, відстежувати підозрювану людину або транспортний засіб по відеозапису.

В останні роки було доведено, що автономні роботи є однією з найцікавіших областей досліджень. Виявлення об'єкта - це основне завдання, яке виконує робот для ідентифікації прилеглих об'єктів і виконувати деякі операції, такі як надання інформації, відкриття-закриття дверей, сигналізація і т.ін.

Виявлення людини також є складним завданням в комп'ютерному зорі, тому що люди як об'єкти мають різний зовнішній вигляд і приймають широкий спектр поз.

Для ідентифікації людей за зображеннями або відеозаписами було запропоновано різні архітектури виявлення об'єктів, така як виявлення пішоходів.

Виявлення об'єктів використовувалося для ідентифікації індивідуальної особи, і це перша область застосування у виявленні об'єктів людини. Функція розпізнавання осіб забезпечує високу точність виявлення при мінімізації часу обчислень. Розпізнавання обличчя допомогло адаптувати виявлення об'єктів до різних областей застосування. Зараз багато додатків використовують цю ідею для виявлення посмішок у режимі реального часу за допомогою камер, макіяжу обличчя, розрахунку віку тощо. З розвитком технологій Інтелектуальних Транспортних систем, таких як безпілотний автомобіль, збільшилась сфера досліджень. Ці інтелектуальні системи необхідні для ідентифікації, визначення місця розташування або відстеження прилеглих об'єктів і контролю швидкості транспортного засобу. Система виявлення об'єктів також працює з більш

дрібнозернистими зображеннями та зображеннями регіонального рівня, такими як виявлення та розпізнавання світлофорів.

Обмеження виявлення об'єктів:

– Мультиклас: різні програми вимагають одночасного виявлення більш ніж одного класу об'єктів. Таким чином, швидкість обробки виявлення стає важливою проблемою, а також можливість багаторазової класифікації без будь-якої втрати точності. Деякі методи виявлення об'єктів або навчені моделі обмежуються виявленням об'єктів одного класу з певним видом. Вони не можуть виявити один і той же об'єкт з різними видами, позами або варіаціями ракурсу.

– Об'єкт на зображенні представлений з різними співвідношеннями сторін і просторовим розташуванням. Припустимо, що розмір об'єкта дуже малий, наприклад, менше 5% зображення, тоді система не зможе виявити ці менші об'єкти. Іноді об'єкти розташовані дуже близько один до одного, як стопка тарілок, тому виявити ці об'єкти дуже складно.

– Ефективність - важливий параметр, вимірюваний для кожної системи виявлення об'єктів. Деякі з розроблених систем виявлення об'єктів відрізняються надійністю і швидкою обробкою, але вони вимагають високоефективних ресурсів (центрального і графічного процесорів). Мікросистеми мають дуже обмежені ресурси для обробки, тому це складне завдання.

– Моделі виявлення об'єктів можуть виявляти лише ті, для яких навчена модель. Наприклад, модель виявлення м'яча виявляє м'яч, і іноді вона розпізнає апельсин як м'яч, тому що апельсин має приблизно таку ж форму. Основною причиною несправності виявлення є те, що об'єкт з м'ячем не вмикається під час тренування.

У процесі створення моделі машинного навчання інші роботи зазвичай використовують різні алгоритми та архітектури, такі як згорткові нейронні мережі (CNN) [284, 285], опорні векторні машини (SVM) [282, 286, 287], вибір функцій [288] та багато інших. Результати цих різних алгоритмів і архітектур також можуть відрізнятися один від одного, що робить кожен з них унікальним і має свій власний найкращий варіант використання. Що стосується самого

виявлення об'єктів, то деякі з найбільш часто використовуваних архітектур, що використовуються за останні кілька років, складаються з однократних мультибоксових детекторів (SSD) [289], You Only Look Once (YOLO) [290], а також Region Based Convolutional Neural Networks (RCNN) та Faster -RCNN [291, 292, 293].

За останні кілька років у багатьох дослідженнях порівнювалися продуктивність і результативність алгоритмів виявлення об'єктів в конкретному випадку і навколишньому середовищу. Однак дослідження недостатньо вивчили новий алгоритм виявлення об'єктів, такий як YOLOv5. В даний час існує дуже мало досліджень, пов'язаних з YOLOv5 та його попередниками або іншими алгоритмами виявлення об'єктів, особливо для виявлення декількох об'єктів на дорозі.

Кілька статей порівнювали алгоритми виявлення об'єктів, специфічні для одного типу об'єктів на дорозі. Стаття С. Чоял та А.К. Сінгх [294] провели порівняння між FASTER-RCNN та SSD MobileNet на дорожніх знаках.

Результати показали, що FASTER-RCNN є більш точним, але вимагає більше часу на навчання, ніж SSD MobileNet. Крім того, подібне дослідження було проведено М. Шахудом та ін. [295] порівняли підтипи YOLOv3 на дорожніх знаках і виявили, що YOLOv3-tiny на 13% менш точний, ніж YOLOv3, але YOLOv3-tiny дуже корисний у програмах реального часу через високу частоту кадрів-до 200 кадрів в секунду (FPS).

Одним з важливих об'єктів для виявлення на дорозі є люди. С. Е. Кім та ін. [296] провели порівняння багатьох алгоритмів виявлення об'єктів, порівнювали алгоритми FASTER-RCNN, YOLO, SSD та R-FCN. Було виявлено, що YOLOv3 є найбільш ідеальним для виявлення людей, оскільки він дає відносно точні результати за розумний час. Мао та ін. [297] запропонували вдосконалення YOLOv3 з використанням шару просторового пірамідального об'єднання (SPP), щоб YOLOv3 краще працював для виявлення транспортних засобів. Його дослідження дозволили підвищити точність і частоту помилок YOLOv3 при виявленні транспортних засобів.

Інший об'єкт, який часто з'являється на дорозі, а саме вибоїни, був піднятий в якості теми виявлення об'єктів Пінг та ін [298]. В цій роботі було виявлено, що YOLOv3 є найефективнішим алгоритмом, оскільки його швидкість та результати виявлення є більш надійними, ніж у HOG, SSD та Faster-RCNN. Крім того, на узбіччі дороги також часто з'являються інші об'єкти, такі як дерева. Порівняння YOLOv3-SPP та YOLOv3 було проведено Інхуа та ін. [299]. В результаті стверджується, що YOLOv3-SPP є найбільш підходящим для виявлення дерев.

З цих досліджень YOLOv3 був обраний ідеальним алгоритмом виявлення об'єктів або основною темою дослідження. Не тільки для виявлення об'єктів на дорозі, але і для виявлення інших об'єктів, таких як виявлення маски, виконане Лю і Рен [300]. Де YOLOv3 може досягти хорошої продуктивності та меншого часу виведення, ніж Faster-RCNN.

Було проведено не так багато досліджень нового покоління YOLO для виявлення об'єктів на дорозі. Коли це відбувається, результати порівняння не настільки задовільні, як, наприклад, дослідження С. Kumar та ін. [301] щодо виявлення кількох об'єктів на камерах спостереження. Оскільки пояснення експериментального методу є неповним, а показники, що використовуються при оцінці, не стандартизовані. Однак при виявленні інших об'єктів нове покоління YOLO було добре порівняне, наприклад, порівняння YOLOv4 і YOLOv5 при виявленні ізоляторів Рахманом та ін [302].

Було проведено багато досліджень у порівнянні виявлення об'єктів YOLO. Можна сказати, що порівняльне дослідження виявлення об'єктів, яке часто з'являється в дорожньо-транспортних пригодах, проводиться на YOLOv3, FASTER-RCNN і SSD MobileNet. Хоча в кількох дослідженнях використовується алгоритм YOLOv5, лише деякі з них були зосереджені на порівнянні алгоритму YOLOv5 з його попередниками, явно виявляючи безліч об'єктів на дорозі.

### **Метрики оцінювання**

Для оцінки алгоритмів використовуються кілька показників продуктивності. У цьому дослідженні було обрано Precision, recall, F1-score, mAP

та час виведення. Показники продуктивності будуть оцінюватися на основі тестового набору даних.

$$Precision = \frac{TruePositive}{TruePositive+FalsePositive} \quad (1)$$

$$Recall = \frac{TruePositive}{TruePositive+FalseNegative} \quad (2)$$

$$F1 - Score = 2 \cdot \frac{Precision \cdot Recall}{Precision+Recall} \quad (3)$$

$$mAP = \frac{\sum_{q=1}^Q AveP(q)}{Q} \quad (4)$$

$$Energy\ efficiency = \frac{Average\ power\ (Joule/Second)}{Inference\ speed\ (Frame/Second)} \quad (5)$$

Дослідники в своїх роботах часто використовують таку метрику, як чутливість (sensitivity). Насправді чутливість і повнота оцінюють одне і те ж, відмінність в найменуванні виникло через приналежність цих термінів до різних галузей науки. Так само зустрічаються назви True positive rate або TPR (оцінка вірно позитивних) і Probability of detection (ймовірність виявлення).

Рівняння (1), Precision визначає відсоток правильних прогнозів порівняно з хибнопозитивними та істинно позитивними, які вимірюють наскільки точні результати прогнозування. Рівняння (2) визначає, наскільки добре алгоритм знаходить усі позитивні випадки.

Рівняння (3), Оцінка F1 - це баланс між точністю і повнотою, значення знаходиться в діапазоні від 0 до 1. Більш високий бал F1 - означає кращий баланс точності та повноти. F-міра-зважене гармонійне середнє повноти і точності. Цей показник демонструє, як багато випадків прогнозується моделлю правильно, і скільки справжніх екземплярів модель не пропустить. F-міра об'єднує в собі інформацію про повноту і точності використовуваної моделі.

Специфічність - це показник, що відображає точність роботи моделі бінарної класифікації. Специфічність визначається як відношення числа істинно-негативних класифікацій TN (true negative) до загальної кількості негативних



класифікацій, тобто сумі істинно-негативних і хибнопозитивних FP (false positive, помилок I роду) класифікацій:

$$Specificity = \frac{TrueNegative}{TrueNegative + FalsePositive}$$

Якщо число помилково-позитивних класифікацій велике, тобто модель допустила велику кількість помилок, розпізнавши негативні приклади як позитивні, то специфічність прагне до 0. Навпаки, якщо ж число помилково-позитивних спостережень прагне до 0, то специфічність прагне до 1.

Модель, що володіє високою специфічністю (тобто допускає мале число помилок I роду), забезпечує більшу ймовірність правильного розпізнавання для негативних спостережень.

Для вимірювання точності детекторів об'єктів використовується рівняння (4) - середнє значення точності по всіх класах. mAP вважається мірою для аналізу загальної продуктивності алгоритму виявлення об'єктів. У цьому дослідженні також була використана IoU (Intersection-over-Union) – метрика ступеня перетину між двома обмежувальними рамками. Відсоток збігу площі перетину між прогнозованим прямокутником і прямокутником з істинним підставою вимірюється IoU. mAP@.5 означає, що поріг IoU для середньої точності дорівнює 0,5.

Для перевірки обчислювальної ефективності моделі обчислюється кількість операцій з плаваючою комою в секунду (FLOPs) шляхом ділення часу обчислень GPU на загальну кількість FLOPs. Розмір моделі обчислюється на основі загальної кількості параметрів з проміжними картами активації. Для об'єктивного порівняння, FLOPs і обсяг пам'яті (або використання основної пам'яті) розраховуються для пакета розміром в одиницю. Як правило, енергоспоживання графічного процесора вимірюється за допомогою інтерфейсу системного монітора Nvidia (nvidia-smi). Значення потужності вибирається з фіксованим інтервалом в 0,1 секунди і обчислюється середня потужність

графічного процесора. Споживання енергії на зображення вимірюється як відношення середньої потужності до швидкості виводу, як визначено у (5). Енергоефективність визначається як загальна кількість енергії, споживаної для обробки вхідного зображення; більш низьке значення енергоспоживання означає більшу енергоефективність.

**Опис наборів даних.** Вибір набору даних вважається дуже необхідним для виконання різних завдань розпізнавання об'єктів в режимі реального часу. У таблиці 1 показано порівняння декількох різних наборів даних, доступних для додатків автономного водіння, в першу чергу для виявлення дорожніх об'єктів. Анотації включають лише чотири класи (залежно від наявності), а саме транспортний засіб, пішохід, дорожній знак та світлофор. Порівняно з іншими наборами даних для експериментальної оцінки вибрано набір даних BDD100K, що містить 100 тис. зображень (70 тис. навчальних зображень, 20 тис. тестових зображень, і 10 тис. перевірочних зображень) з різних географічних, екологічних і погодних сценаріїв, таких як вулиці, тунелі, заправні станції, автостоянки, житлові будинки і шосе в різних умовах в різний час дня і ночі на міських вулицях з реальним рухом; до 90 об'єктів на зображенні. Кожен об'єкт має логічні значення для перекриття та усічення. У цій роботі вибрано набір даних BDD100K через величезну кількість автономних зображень при складних дорожніх сценаріях і різних погодних умовах. Крім того, набір даних надає зображення в реальному часі для тестування алгоритмів, заснованих на глибокому навчанні, в умовах обмежень, що виконують завдання різної складності. Знімок декількох зображень з набору даних BDD100K показаний на рис. 1

Набір даних BDD100K спочатку містить об'єкти, а саме людину, вершника, велосипед, автомобіль, автобус, вантажівку, поїзд, світлофор і дорожній знак. У цій оцінці нерелевантні вибірки виключаються через дисбаланс класів і, зокрема, чотирьох класів об'єктів, які вважаються найбільш важливими, а саме транспортний засіб (велосипед, легковий автомобіль, автобус, вантажівка), пішохід (людина і вершник), дорожній знак і світлофор зберігаються. Варто зазначити, що кілька зображень у наборі даних визнані недійсними (неправильна

мітка або координати). Після визначення кількості анотованих об'єктів, які розглядаються в цій роботі, вони перераховані в таблиці 2.

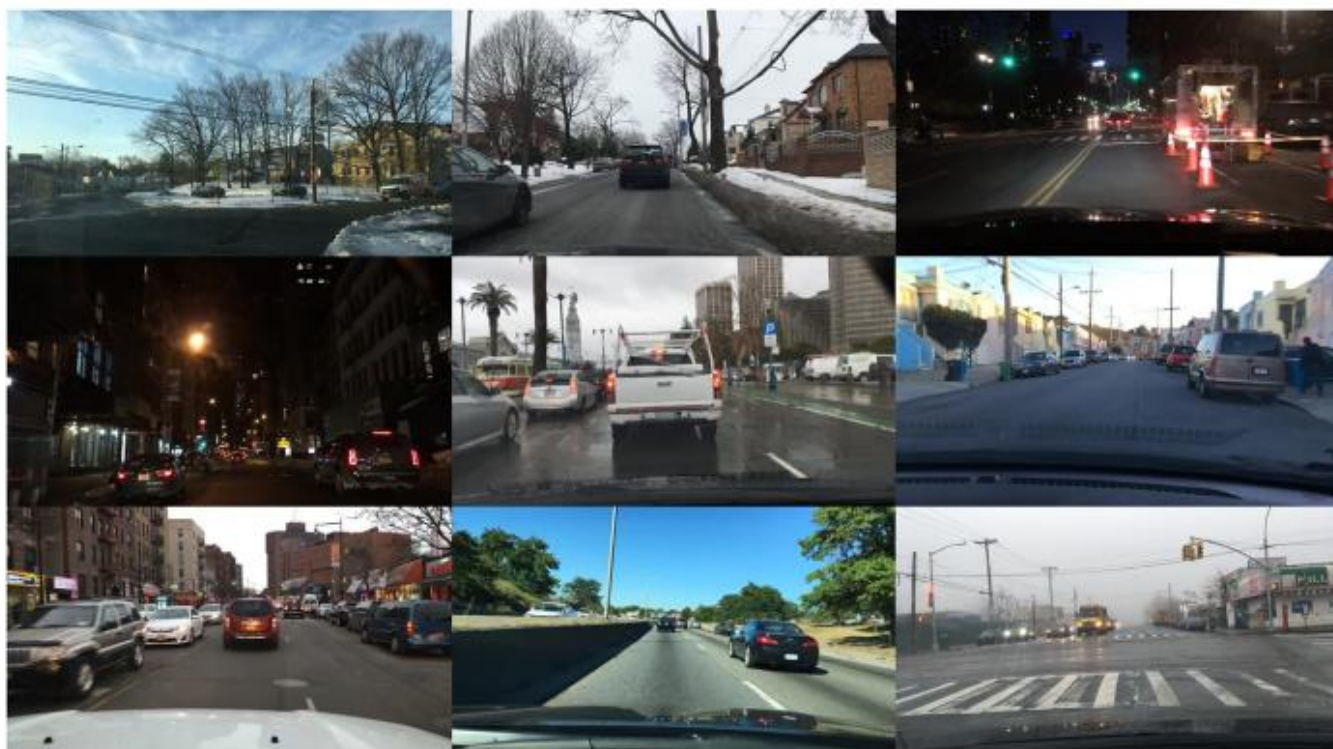


Рисунок 1. Знімок відео з набору даних BDD100K

Таблиця 1.

Наборів даних для виявлення дорожніх об'єктів в режимі онлайн

Набір даних	рік	зображень (x1000)	Класи	Анотації (M)	Різноманітність погоди
Kitti	2012	15	8	0,2	низька
BDD100K	2018	100	10	1,8	висока
ApolloScape	2018	144	27	2.1	низька
EuroCity	2019	47	30	0,8	середня
nuScenes	2019	1386	23	224	середня

Кількість анотованих об'єктів у наборі даних BDD100K

Набір даних	транспортні засоби	пішоходи	дорожні знаки	світлофори
Навчання	765,066	95,866	239,686	186,117
Тестування	218,587	27,524	68,984	53,291
Валідація	109,807	13,911	34,908	26,885

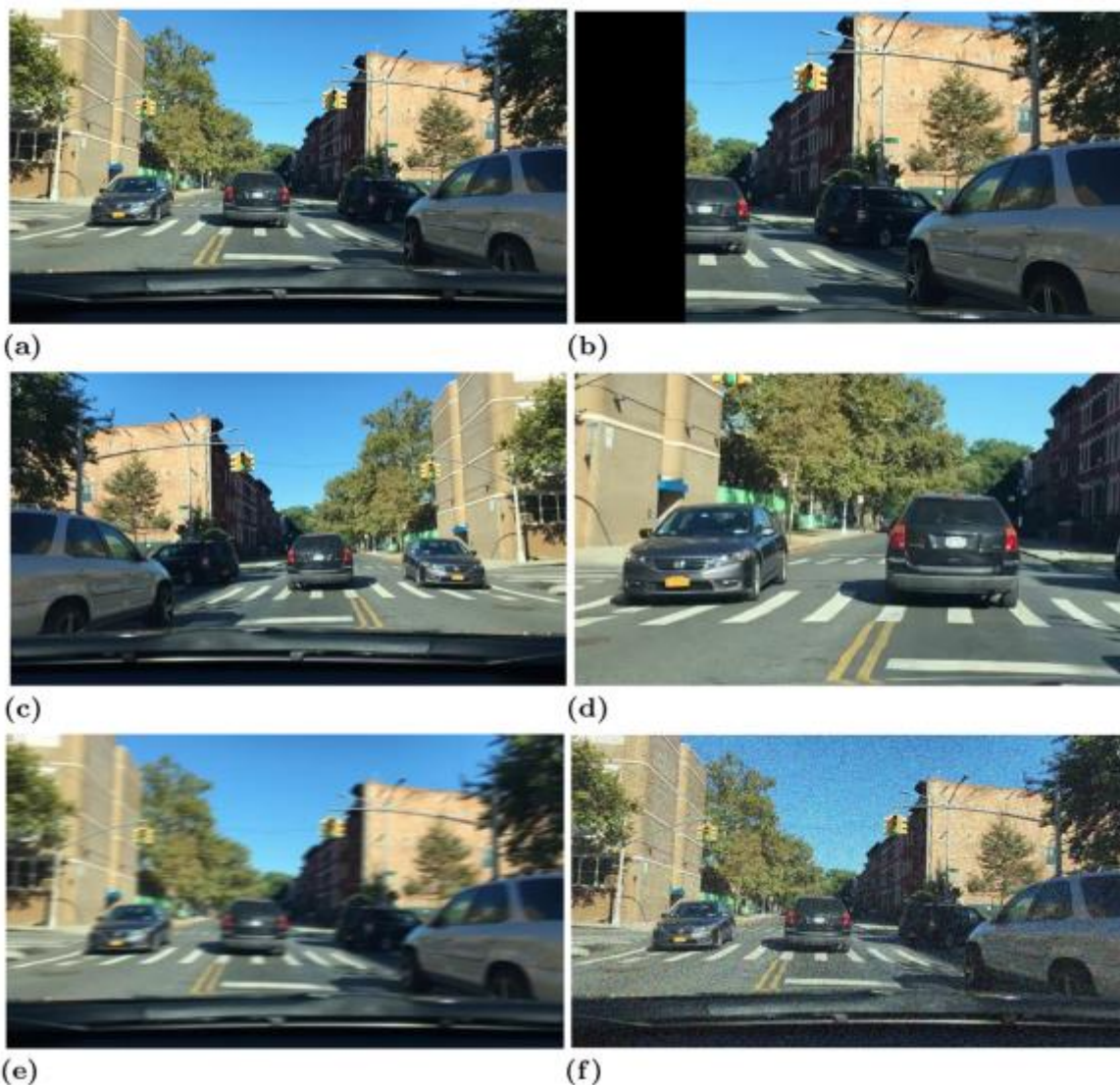


Рисунок 2. Методи збільшення даних (а) оригінальне зображення (б) зміщення (с) горизонтальне перевертання (д) випадкова обрізка (е) розмиття руху (ф) додавання випадкового шуму

Збільшення обсягу даних-це набір різних методів, що використовуються для збільшення розміру та якості навчальних моделей. Мета полягає в тому, щоб

збільшити здатність до узагальнення без зміни категорії зображень. У цій роботі виконується кілька основних операцій зі збільшення набір даних BDD100K, що включає зміщення зображення, горизонтальне перевертання, випадкове масштабування, випадкове обрізання, розмиття руху та додавання випадкового шуму, як показано на рис. 2. На додаток до основних методів збільшення, у цій роботі використовується Мозаїчне збільшення даних.

Мозаїка - це новий метод збільшення даних, запропонований Гленном Йохером у 2020 році, який використовує чотири навчальні зображення замість одного зображення. Цей метод має дві основні переваги.

По-перше, модель вчиться розпізнавати об'єкти поза звичайними контекстами, знайденими в наборі даних. По-друге, це покращує статистику пакетної нормалізації за допомогою невеликих міні-пакетів, що робить можливим навчання на одному графічному процесорі.

**Експериментальна установка.** Популярні фреймворки глибокого навчання Tensorflow та Caffe використовуються для навчання моделей відповідно до офіційної документації. Експериментальне середовище складається з CUDA v10.1, cuDNN v7.6.4, OpenCV v4.5.0, ОС Ubuntu 18.04.5, 16 ГБ оперативної пам'яті, Intel i7-8750H центральний процесор і графічний процесор Nvidia GeForce RTX2080ti. Збільшення застосовується до навчальних та перевірочних зображень для підвищення здатності до навчання. Тому для прискорення цієї оцінки використовуються оптимальні розміри пакетів 2 (для Mask-rcnn), 4 (для R-FCN і RetinaNet) і 8 (для SSD і YOLOv4) . Стохастичний градієнтний спуск (SGD) використовується як оптимізатор під час навчання. Початкове значення швидкості навчання встановлено на 0,1, швидкість імпульсу встановлена на 0,949, а швидкість загасання встановлена на 0,0001, щоб зменшити втрати навчання та запобігти вибуху градієнта. Швидкість навчання знижується на 0,5 на кожну 50-ту епоху. Жодні інші параметри не були змінені та прийняті фреймворками за замовчуванням. Навчання тривало 200 епох.

Після навчання обчислюються ваги мережі для перевірки експериментальних результатів на зображеннях з тестового набору даних BDD100K.

У таблиці 3 наведена продуктивність алгоритмів виявлення об'єктів з урахуванням часу виведення на зображення і швидкості в кадрах в секунду на CPU і GPU-процесорі. У таблиці 4 наведені чутливість і специфічність для кожного класу, А також середні чутливість і специфічність моделей виявлення об'єктів. У таблиці 5 наведено порівняння з точки зору архітектури, використаної в цьому експерименті, розміру моделі, обсягу пам'яті, збоїв та енергоефективності. Всі результати отримані на зображеннях з тестового набору даних BDD100K. найкращі значення в таблицях виділені жирним шрифтом.

Таблиця 3.

Час виведення та швидкість моделей виявлення об'єктів на наборі даних BDD 100k

Модель	процесорний час (мс)	Час роботи графічного процесора (мс)	швидкість процесора (кадр / сек)	швидкість графічного процесора (кадр / сек)
R-FCN	2967,36	178,96	3,37	5,58
Mask R-CNN	3412,57	326,78	2,93	3,06
SSD	<b>72.98</b>	<b>19.12</b>	<b>13.70</b>	<b>52.31</b>
RetinaNet	3686.12	97.66	2.71	10.24
YOLOv4	121.53	20.19	8.23	49.52

Таблиця 4.

Продуктивність моделей виявлення об'єктів на наборі даних BDD 100k

Модель	Клас	Чутливість ( % )	специфічність (%)
R-FCN	транспортний засіб	68.20	70.24
	Пішохід	62.69	63.16
	Дорожній знак	58.43	60.87
	Світлофор	55.17	56.46
	середнє значення	61,14	62,68



Продовження таблиці 4

Mask R-CNN	транспортний засіб	89.21	83.26
	Пішохід	86,58	80,32
	Дорожній знак	82.64	75.26
	Світлофор	79.76	73.15
	середнє значення	84,58	77,80
SSD	транспортний засіб	63.21	66.21
	Пішохід	57,82	61,84
	Дорожній знак	46.81	50.36
	Світлофор	42.49	44.27
	середнє значення	54,59	55,69
RetinaNet	транспортний засіб	81.19	85.12
	Пішохід	80.27	82.16
	Дорожній знак	79.81	81.49
	Світлофор	79.38	80.62
	середнє значення	80,17	82,35
YOLOv4	транспортний засіб	<b>91.24</b>	<b>92.49</b>
	Пішохід	<b>88.19</b>	<b>89.14</b>
	Дорожній знак	<b>85.65</b>	<b>86.20</b>
	Світлофор	<b>83.14</b>	<b>84.16</b>
	середнє значення	<b>87,06</b>	<b>87,90</b>

Таблиця 5.

Порівняння моделей виявлення об'єктів з точки зору енергоефективності та інших аспектів

Модель	Розмір базової моделі (МБ)	Обсяг оперативної пам'яті (ГБ)	FLOPs (G)	Енергоефективність (J/image)
R-FCN	436.12	3.89	306.81	127.64
Mask R-CNN	573.48	5.34	614.23	168.19
SSD	<b>136.04</b>	<b>0.73</b>	<b>95.86</b>	<b>5.38</b>
RetinaNet	471.74	3.32	359.32	47.31
YOLOv4	269.53	1.89	179.65	7.16

Двоступеневі детектори, як правило, демонстрували кращу точність виявлення порівняно з одноступінчатими детекторами. Згідно з наведеними вище експериментальними результатами, спостерігається, що одноступінчатий алгоритм виявлення YOLOv4 має видатну продуктивність з точки зору швидкості і точності, а також досить високу енергоефективність в порівнянні з іншими одноступінчатыми і двоступеневими алгоритмами виявлення дорожніх об'єктів, оскільки він використовує CSPDarkNet-53, яка підвищує точність класифікатора і детектора. Більше того, додавання блоку SPP за допомогою PANet збільшує поле сприйняття, яке відокремлює найважливіші контекстні функції без зменшення швидкості мережі. Завдяки цьому точність виявлення YOLOv4 перевершує двоступеневі детектори, а перевага полягає у високій швидкості виявлення в наборі даних BDD100K. двоступеневий алгоритм виявлення Mask R-CNN демонструє хорошу точність виявлення, оскільки він використовує RoIAlign для отримання більш точного вирівнювання меж від пікселя до пікселя.

SSD демонструє низьку точність і чуйність, оскільки модель виконує виявлення середніх і малих цілей з дуже невеликої кількості шарів; отже, вона не має достатньо семантичної та крайової інформації для виявлення більшості дорожніх об'єктів. Тоді як R-FCN демонструє низьку точність та чуйність, оскільки не використовує глобальний середній пул. Таким чином, остаточні прогнози базуються на картах об'єктів, чутливих до місця розташування, що зменшує загальну точність та чуйність. Mask R-CNN демонструє низьку точність, оскільки вона ігнорує просторову інформацію між сприймаючими полями, а це означає, що вона не враховує деталі екземпляра між крайовими пікселями. Крім того, Mask R-CNN використовує багатомасштабний FPN, а модуль RoIAlign зменшує невідповідність між достовірністю класифікації та прогнозованими блоками, покращуючи виявлення середніх та малих цілей. Частота відгуків Mask R-CNN близька до YOLOv4 для виявлення об'єктів із закриттям і усіченням, оскільки кількість помилкових виявлень значно перевищує кількість правильних виявлень; тому його не можна вважати



збалансованим алгоритмом. У цій роботі виявлено, що точність двоступеневих моделей нижча, ніж одноступеневих. Зі зміною рівня виявлення продуктивність знижується при перетворенні перекриття та усічення, особливо для SSD, оскільки він почав пропускати цілі. SSD демонструє високу точність і низький рівень відкликання, тим самим збільшуючи частоту виявлення промахів, що вказує на те, що він був більш неконтрольованим при виявленні середніх і дрібних цілей; отже, його не можна вважати збалансованим алгоритмом. Навпаки, в RetinaNet володіє високою адаптивністю до багатомасштабних зображень завдяки використанню FPN і Focal; таким чином, він забезпечує хороші результати при виявленні середніх і великих цілей. RetinaNet можна розглядати як збалансований алгоритм.

Тим не менш, YOLOv4 є більш збалансованим алгоритмом, ніж інші моделі, оскільки він забезпечує високу точність при швидкому відтворенні на всіх рівнях категорії для всіх дорожніх об'єктів.

З таблиці 5 зрозуміло, що SSD можна вважати швидким алгоритмом виявлення об'єктів у двоступеневих та одноступеневих моделях виявлення без будь-яких додаткових вимог до обладнання.

Швидкість виявлення YOLOv4 майже така ж, як SSD з вимогами до графічного процесора. Швидкість виявлення Mask R-CNN низька через використання додаткової гілки модулем RoIAlign, що збільшує час обчислень для остаточної класифікації та регресії обмежувального поля. YOLOv4 демонструє високу чутливість і специфічність у всіх класах. Тим часом двоетапний алгоритм виявлення Mask R-CNN показує низьку середню специфічність, оскільки RPN не може виконати регресію обмежувального поля для невеликих об'єктів, що вказує на велику кількість помилкових виявлень. RetinaNet демонструє більш високу середню специфічність, ніж Mask R-CNN, через жорсткий відбір негативних класів під час навчання.

Mask детектора R-CNN має великий розмір моделі та великий обсяг пам'яті. Крім того, маска R-CNN показує велику кількість провалів оскільки вони використовують надлишкові сприйнятливі поля для виявлення об'єктів, що

перекриваються, що призводить до збільшення обчислень та збільшення споживання енергії. У R-FCN використовується велика кількість обчислень RPN і відсутня оптимізація шкал і коефіцієнтів прив'язки, що призводить до неефективного споживання енергії. SSD має невеликий розмір моделі і меншу кількість збоїв, що забезпечує високу енергоефективність. Хоча YOLOv4 використовує трохи більше енергії, ніж SSD, завдяки більшій кількості параметрів, він дає кращі результати, ніж інші моделі виявлення об'єктів. RetinaNet використовує RPN для фільтрації багатьох негативних пропозицій-кандидатів, що призводить до більшої кількості збоїв і енергоспоживання, ніж в інших моделях одноступінчастого виявлення.

Для подальшого аналізу ефективності виявлення в цій роботі використовуються конкретні тестові зразки, аналогічні реальному дорожньому сценарію з набору тестових даних BDD100K.

Таблиця 6.

Короткий опис різних характеристик моделей виявлення об'єктів

Модель	Точність	швидкість	складність	ефективність
R-FCN	низька	повільна	середня	низька
Mask R-CNN	середня	повільна	висока	низька
SSD	низька	швидкий	низька	висока
RetinaNet	середня	помірна	висока	середня
<b>YOLOv4</b>	<b>висока</b>	<b>швидкий</b>	<b>середня</b>	<b>висока</b>

Згідно з оцінкою наведених вище експериментальних результатів, у таблиці 6 узагальнено порівняння різних алгоритмів виявлення об'єктів з точки зору загальної точності виявлення (середнє значення mAP), швидкості виведення (швидкість графічного процесора), обчислювальної складності (кількість збоїв) та ефективності (енергоефективність). Критерії загальної точності виявлення встановлені як низькі ( $<50$ ), середні ( $\geq 50$  і  $< 75$ ) і високі ( $\geq 75$ ). Критерії швидкості виведення встановлюються як швидка ( $>30$ ), помірна ( $\leq 30$  і  $> 10$ ) і повільна ( $\leq 10$ ). Критерії обчислювальної складності встановлені як низька ( $<100$ ), середня ( $\geq 100$ )

$i < 350$ ) і висока ( $\geq 350$ ). Критерії енергоефективності встановлені як низькі ( $> 50$ ), середні ( $\leq 50$  і  $> 10$ ) і високі ( $\leq 10$ ).

Таким чином, модель одноступінчастого виявлення YOLOv4 продемонструвала видатну точність при високій швидкості виявлення та високій енергоефективності, задовольняючи сучасним стандартам виявлення об'єктів у режимі реального часу.

Виконаємо порівняльний аналіз моделей одноступінчастого виявлення YOLO.

З метою визначення найшвидших моделей YOLO для кожної GPU, враховуючи швидкість та продуктивність, базові моделі YOLO перевіряються на GPU від NVIDIA, таких як TESLA P100, TESLA V100, GTX 1080Ti та RTX 4090.

Різні версії YOLO, такі як YOLOv4, YOLOv5, YOLOv6 та YOLOv7, пропонують компроміси між швидкістю та точністю. Наприклад, варіанти Nano та Tiny акцентують легкість та швидку продуктивність, тоді як наступні версії, наприклад YOLOv7, забезпечують вищу точність, виходячи за межі невеликого зниження швидкості.

Як показано на рисунку 4, графік надає інформацію про продуктивність різних моделей YOLO на різних пристроях GPU.

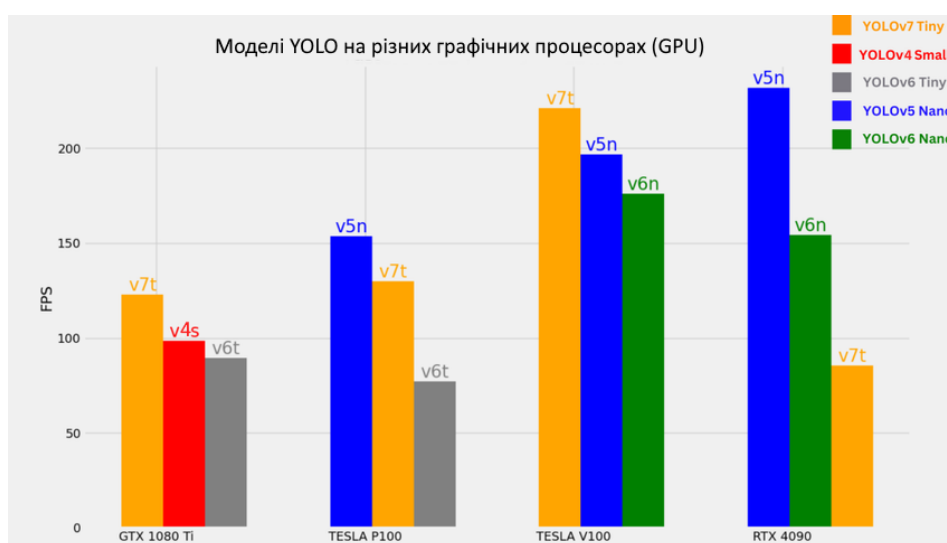


Рисунок 4. Моделі YOLO на різних графічних платформах

По-перше, з графіка видно, що YOLOv5 видає найкращі результати за швидкістю на GPU RTX 4090 та TESLA P100. Це свідчить про те, що, якщо основний критерій - досягнення найвищої кількості кадрів на секунду (FPS) для точного виявлення в реальному часі, YOLOv5 Nano стане оптимальним вибором. По-друге, YOLOv7 Tiny виділяється як модель, яка надає найвищу пропускну здатність на GTX 1080 Ti та TESLA V100. Пропускна здатність визначається кількістю об'єктів, виявлених за одиницю часу, і YOLOv7 Tiny в цьому виявляється найкращим для цих конкретних пристроїв GPU. Це особливо корисно в сценаріях, коли точне виявлення більшої кількості об'єктів важливіше, ніж досягнення максимальної кількості кадрів на секунду.

На противагу, моделі YOLOv6 Nano та Tiny, хоч і не досягають такої ж швидкості, що YOLOv5 та YOLOv7, але все ж не вважаються дуже повільними. Хоча графік не містить точних даних про їхню продуктивність, він вказує на те, що ці моделі забезпечують баланс між швидкістю та точністю. Вони можуть бути чудовим вибором, коли потрібна помірна швидкість, при цьому отримуючи задовільні результати об'єктивного виявлення.

Узагальнюючи, кращий вибір залежить від конкретних вимог завдання. YOLOv5 Nano ідеально підходить для реальних застосувань, де важлива максимальна кількість кадрів на секунду. YOLOv7 Tiny видається корисним у сценаріях, де важлива висока пропускна здатність більше, ніж продуктивність в реальному часі. Тим часом моделі YOLOv6 Nano і Tiny пропонують компроміс між швидкістю та точністю, що робить їх прийнятними у випадках, коли потрібна помірна швидкість без значних втрат у якості виявлення.

Як зображено на рисунку 5, на платформі процесорів, модель YOLOv5 отримує найвищий показник швидкості. Ця модель може працювати в реальному часі, перевищуючи 30 кадрів на секунду. Це означає, що вона може обробляти та аналізувати зображення або відеопотоки в реальному часі, що надає швидкі результати об'єктивного виявлення. Модель YOLOv5 добре оптимізована для ефективності та швидкості, що робить її добре пристосованою для процесорів споживчого класу, де реальний час має велике значення.

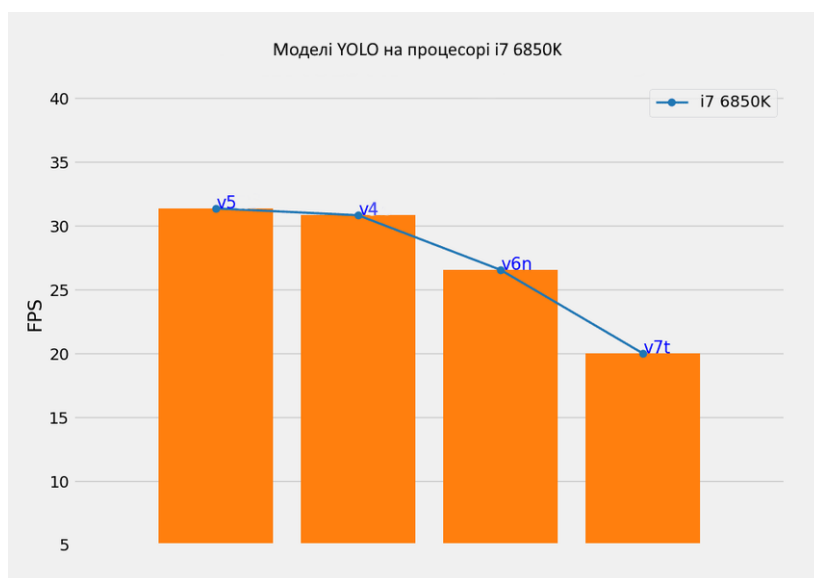


Рисунок 5. Чотири найшвидші моделі виявлення об'єктів YOLO на процесорі i7 6850K

З іншого боку, модель YOLOv7 Tiny, хоч і здатна до об'єктивного виявлення в реальному часі, працює трохи повільніше в порівнянні з моделлю YOLOv5. Зазвичай вона працює на рівні близько 20 кадрів на секунду, що все ж вражає і підходить для багатьох реальних застосувань. Хоча вона може не досягати такої швидкості, як YOLOv5, модель YOLOv7 Tiny забезпечує баланс між швидкістю та точністю, забезпечуючи задовільні результати при ефективній обробці на загальнодоступних процесорах.

Згідно з наданими результатами виявлено, що менші моделі, як правило, проявляють вищу продуктивність. Це виявлено у тестах, де моделі YOLOv5 Nano та YOLOv6 Nano виявилися найшвидшими альтернативами. Важливо зазначити,

що навіть на застарілій версії процесора i7 ці моделі здатні досягти вражаючої швидкості понад 30 кадрів на секунду (FPS). Це підтверджує ефективність та оптимізацію моделей YOLOv5, v6 Nano для обробки на процесорах масового споживання, роблячи їх чудовими виборами для об'єктивного виявлення в реальному часі на таких процесорах.

YOLOv5 збалансований алгоритм, надаючи високу точність при швидкому виявленні об'єктів на всіх рівнях категорій дорожніх об'єктів.

З урахуванням проведених досліджень, YOLOv5 виявляє найкращу швидкість роботи, що робить її найбільш оптимальним варіантом для сценаріїв, де вирішальне значення має максимальна кількість кадрів на секунду для точного виявлення в реальному часі.

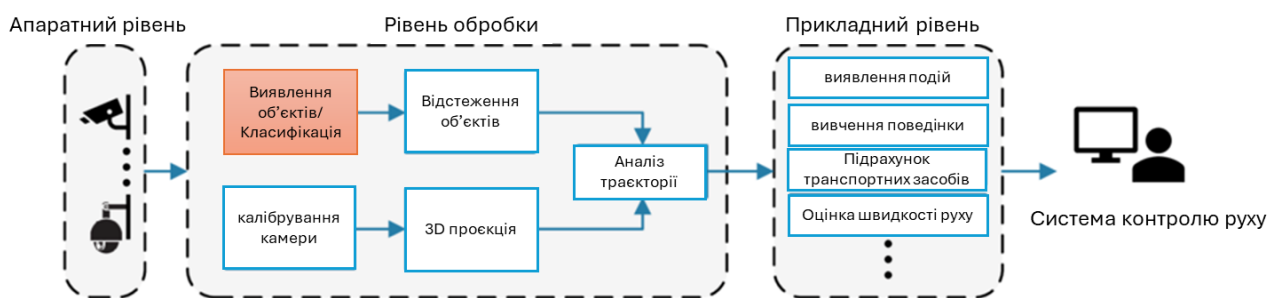


Рисунок 6. Загальна архітектура інтелектуальних систем моніторингу дорожнього руху.

У цьому дослідженні ми пропонуємо використовувати модель YOLOV5 як потенційне рішення для підсистеми виявлення та класифікації об'єктів (рис.6), яка є складовою більш складних інтелектуальних систем моніторингу дорожнього руху. Виявлення об'єктів є ключовим компонентом у розробці цих систем, і виконання подальших кроків значною мірою залежить від виконання цього завдання.

Ідентифікація об'єктів часто розглядається як дуже важливий аспект комп'ютерного зору, насамперед через його широкий спектр практичних застосувань. Термін "ідентифікація об'єктів" відноситься до здатності програмних систем точно визначати просторові координати об'єктів всередині

зображення або сцени, а також класифікувати і маркувати кожен ідентифікований об'єкт.

Ідентифікація осіб, виявлення транспортних засобів, підрахунок пішоходів, онлайн-фотографії, системи безпеки та автомобілі без водія - все це отримало широке застосування. Виявлення об'єктів має широкий спектр застосувань у кількох областях практики. Як і у випадку з іншими комп'ютерними технологіями, очікується, що зусилля програмістів та розробників програмного забезпечення забезпечать широкий спектр інноваційних та чудових програм для виявлення об'єктів.

Використання сучасних методик виявлення об'єктів в різних додатках і системах, а також створення нових додатків, заснованих на цих методологіях, являє собою нетривіальну задачу. На початкових етапах виявлення об'єктів використовувалися класичні методи, зокрема, бібліотеки комп'ютерного зору. Проте, традиційні алгоритми демонстрували недостатню продуктивність при адаптації до різних ситуацій. Пропонована система має ряд переваг: досягнення високого рівня точності та швидкості.

Архітектура системи для інтелектуального виявлення об'єктів у реальному часі на базі YOLOv5 включає кілька ключових компонентів, які взаємодіють між собою для оптимальної функціональності (рис. 7):

Джерела вхідних даних. Цей компонент включає в себе стрічки з камер в реальному часі та відеопотоки з попередньо записаних джерел. Він забезпечує надходження вхідних даних у систему.

Модуль виявлення об'єктів. Основний модуль, що використовує YOLOv5 для точного виявлення та класифікації об'єктів у реальному часі.

Підтримка настоюваних об'єктів. Цей компонент надає можливість навчання та додавання користувацьких класів об'єктів для більш широкого розпізнавання.

Модуль попередньої обробки відповідає за покращення зображень для оптимізації процесу виявлення об'єктів шляхом налаштування розміру, зменшення шуму та підвищення контрастності.

Синхронізація кадрів забезпечує синхронізацію кадрів з різних камер для вирівнювання даних та забезпечення їхньої правильної обробки.

Модуль відстеження об'єктів відстежує та моніторить виявлені об'єкти за допомогою алгоритмів відстеження, наприклад, DeepSORT, що допомагає відслідковувати об'єкти в часі.

Інтерфейс користувача забезпечує зручний спосіб налаштування системи, моніторингу та перегляду результатів виявлення об'єктів через веб-панель.

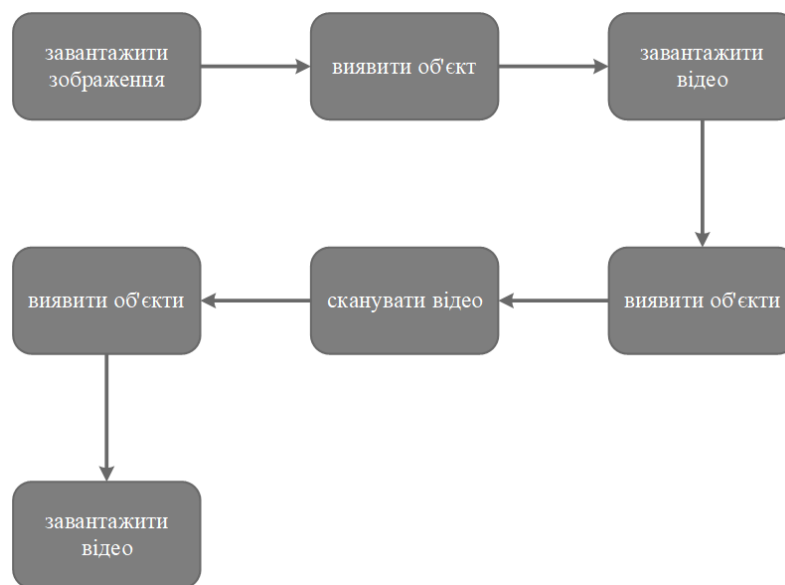


Рисунок 7. Схема робочого процесу системи розпізнавання об'єктів

Ця архітектура надає основу для розробки системи інтелектуального виявлення об'єктів у реальному часі з використанням YOLOv5. Вона може бути налаштована та розширена відповідно до конкретних вимог та потреб для досягнення максимально ефективних результатів.

На рисунках 8 та 9 представлені DFD діаграми для системи розпізнавання об'єктів, які ілюструють потік інформації та функціональні елементи цієї системи на відповідних рівнях представлення.





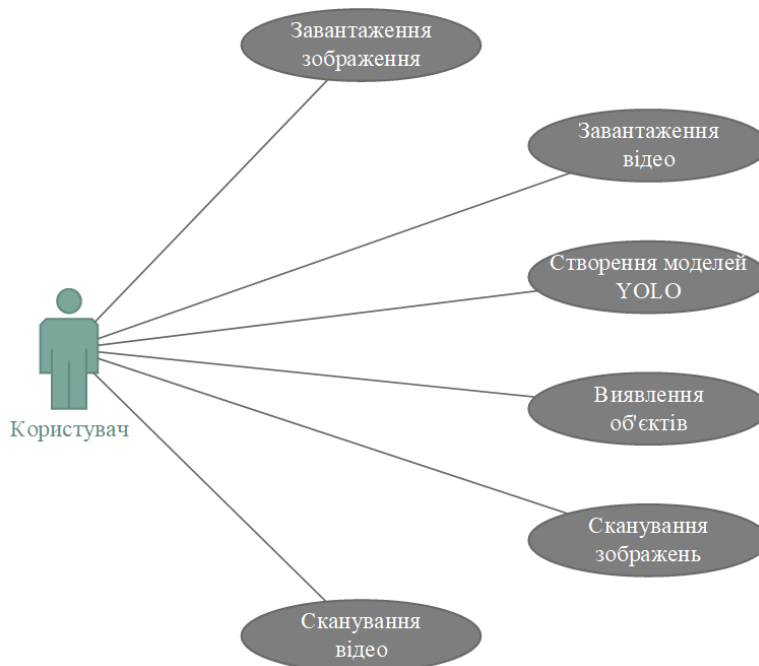


Рисунок 11. Діаграма use-case

На рисунку 12 надана діаграма класів для системи розпізнавання об'єктів, яка ілюструє класи системи, їхні методи та атрибути, а також взаємозв'язки між цими класами. Це допомагає виявити структуру системи та взаємодію між її складовими елементами для більш детального розуміння роботи системи.

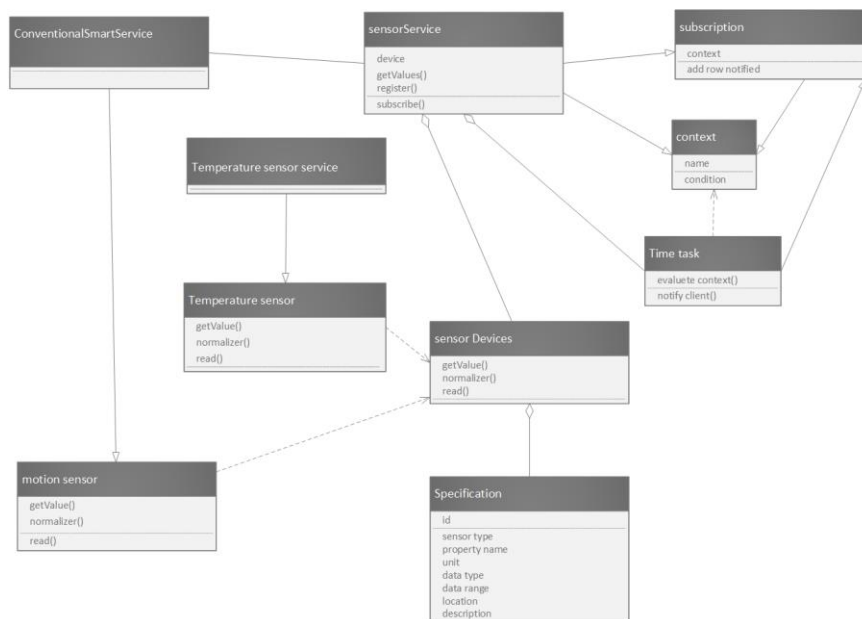


Рисунок 12. Діаграма класів

На рисунку 13 представлена діаграма послідовності для системи розпізнавання об'єктів, які ілюструють взаємодію між різними компонентами системи. Лінії життя представляють об'єкти, які беруть участь у взаємодії, і показують їх активність відносно часу. Повідомлення між об'єктами відображаються стрілками та показують порядок передачі повідомлень.

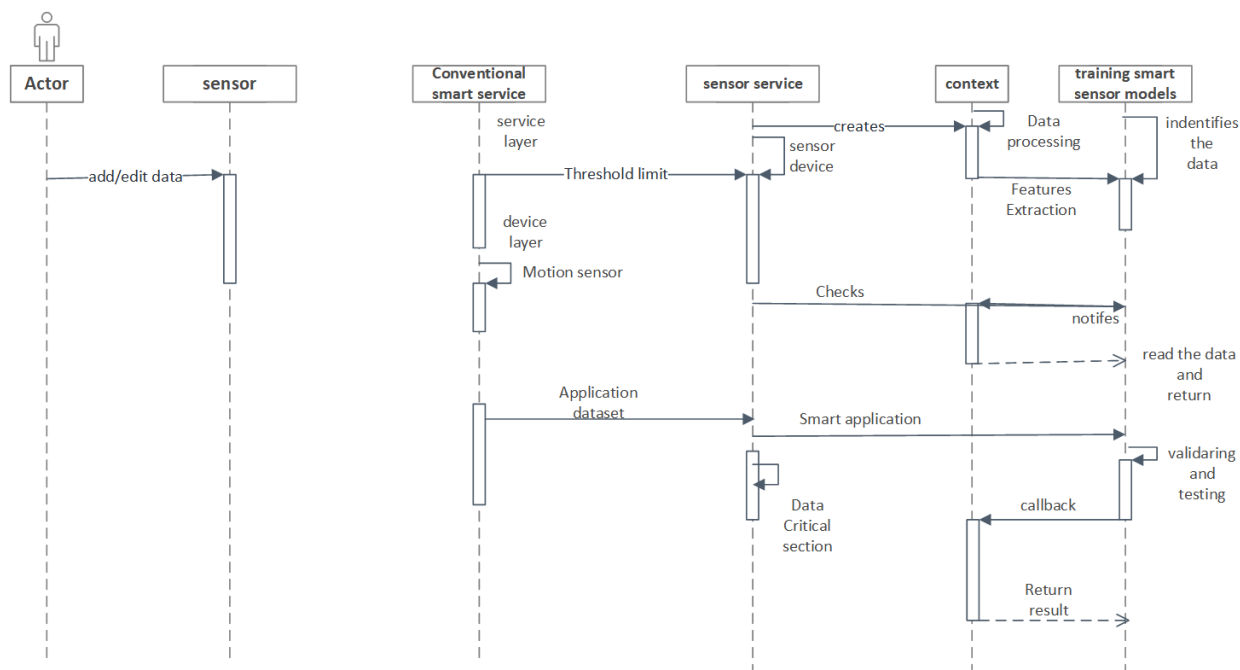


Рисунок 13. Діаграма послідовності

На діаграмі компонентів показано, як компоненти спілкуються один з одним через їхні інтерфейси та порти. Це дозволяє відобразити взаємодію між компонентами та їхню структуру на високому рівні.

Ця діаграма може служити основою для подальшого розроблення деталей архітектури системи та визначення, як компоненти реалізують функціональність системи на більш низькому рівні.

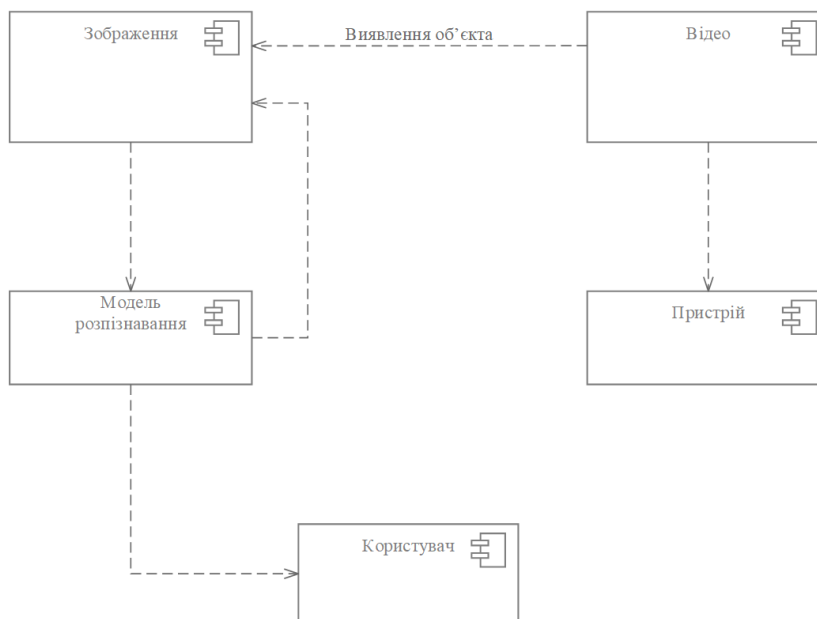


Рисунок 14 – Діаграма компонентів

На діаграмі компонентів для системи розпізнавання об'єктів (рис.14) видно, що дані спочатку передаються великому "прямокутнику", який може представляти собою або саму систему в цілому, або підсистеми та компоненти всієї системи. Це визначається контекстом і рівнем деталізації діаграми.

**Аналіз отриманих результатів моделювання.** Як зазначається в літературних роботах, тіні від транспортних засобів, щільний рух і умови низької освітленості можуть створювати проблеми при виявленні транспортних засобів в денному режимі. Пропонований метод усуває обмеження виявлення транспортних засобів в умовах щільного руху і наявності довгих тіней, як показано на рис. 15 (а) і (б) відповідно. На ньому зображено точне виявлення транспортних засобів, при цьому йому не заважають довгі тіні через сонячне світло. Крім того, система зарекомендувала себе краще при виявленні транспортних засобів в умовах заторів на дорогах.

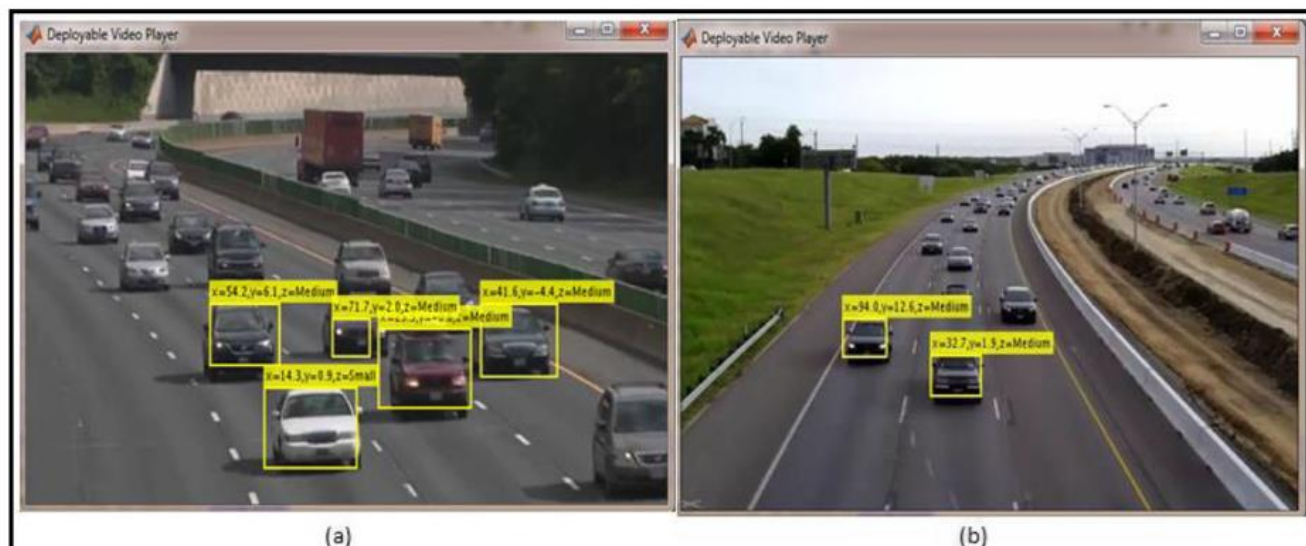


Рисунок 15. Помічені результати виявлення: (а) при наявності пробок на дорогах, (б) виявлення транспортних засобів при наявності довгих тіней.

Запропонована в роботі модель має хорошу надійність порівняно з іншими методами. Запропонована система також включає виявлення транспортних засобів у похмуру погоду. У порівнянні зі звичайним днем, в похмуру погоду освітленість менше. В роботі також розглянуто приклади розпізнавання об'єктів в областях з низькою освітленістю. Проведене дослідження показало хороші результати у виявленні транспортних засобів, як показано на рис. 15. Жовта обмежувальна рамка позначає виявлені транспортні засоби та класифікаційні знаки як малі, середні та великі. На обчислення результатів дослідження пішло 0,62 секунди. Також досягнута точність 94% виявлення транспортних засобів на відео, що містить 345 кадрів розміром  $640 \times 360$ , як показано на рис. 16. Система отримала значення 98% повноти (recall) і 90% precision при виявленні транспортних засобів.

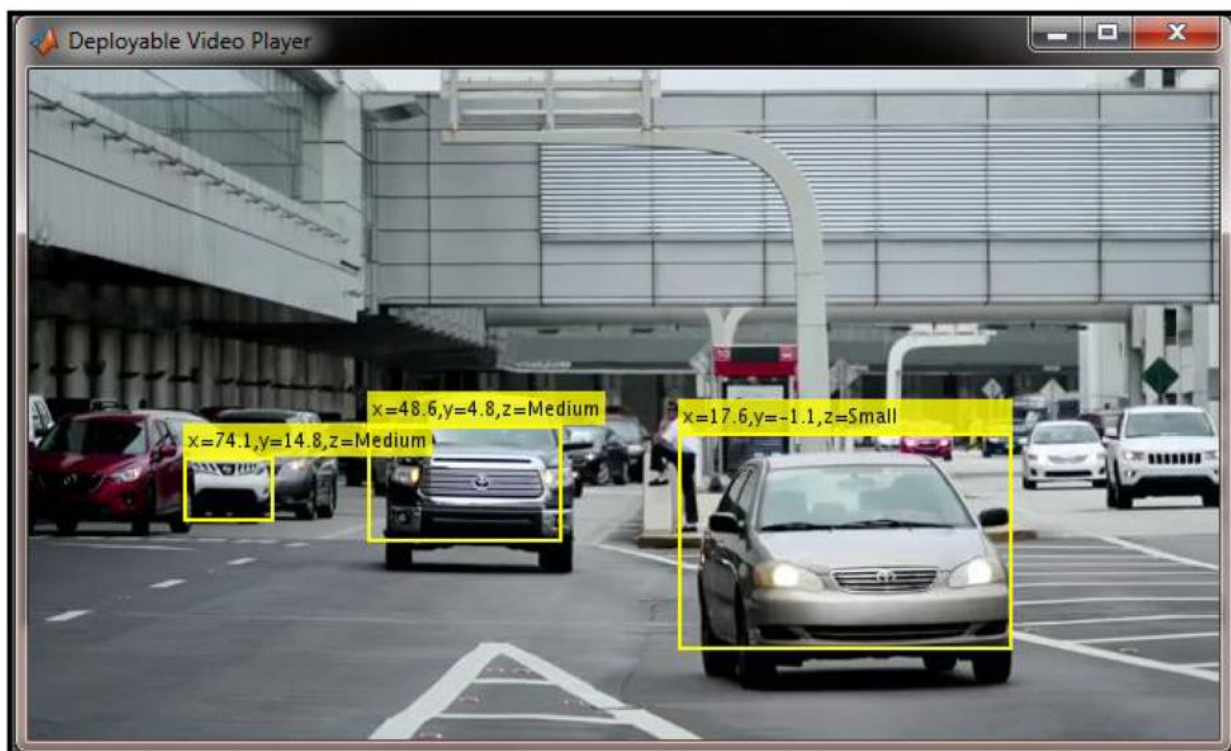


Рисунок 16. Результати виявлення транспортного засобу в похмуру погоду (при слабкому освітленні)

YOLOv5 славиться своїми важливими функціями, такими як швидке отримання точних результатів. Це час, що витрачається системою на обчислення результатів. Час обробки повинен бути невеликим, щоб система могла видавати бажані результати. Представлений аналіз лінійного графіка, який визначає час обробки, витрачений YOLOv5 на обчислення бажаних результатів у денний час. Графік складається з аналізу всіх трьох випадків. Із графіку видно, що модель точно розпізнає багатоцільові транспортні засоби за менший час обробки (рис. 17).

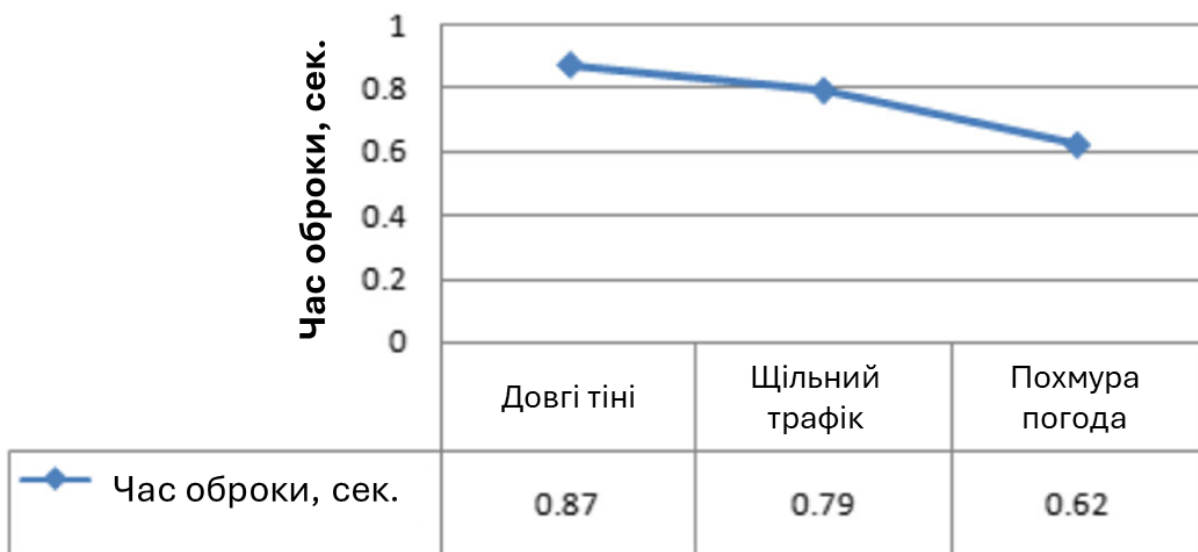


Рисунок 17. Порівняння часу обчислень при різних умовах

У таблиці нижче представлена загальна продуктивність, досягнута при виявленні транспортних засобів в денному режимі з використанням чотирьох показників, зазначених вище. В роботі розраховані показники оцінки для кожного випадку в денному режимі, і результати наведені в таблиці 7.

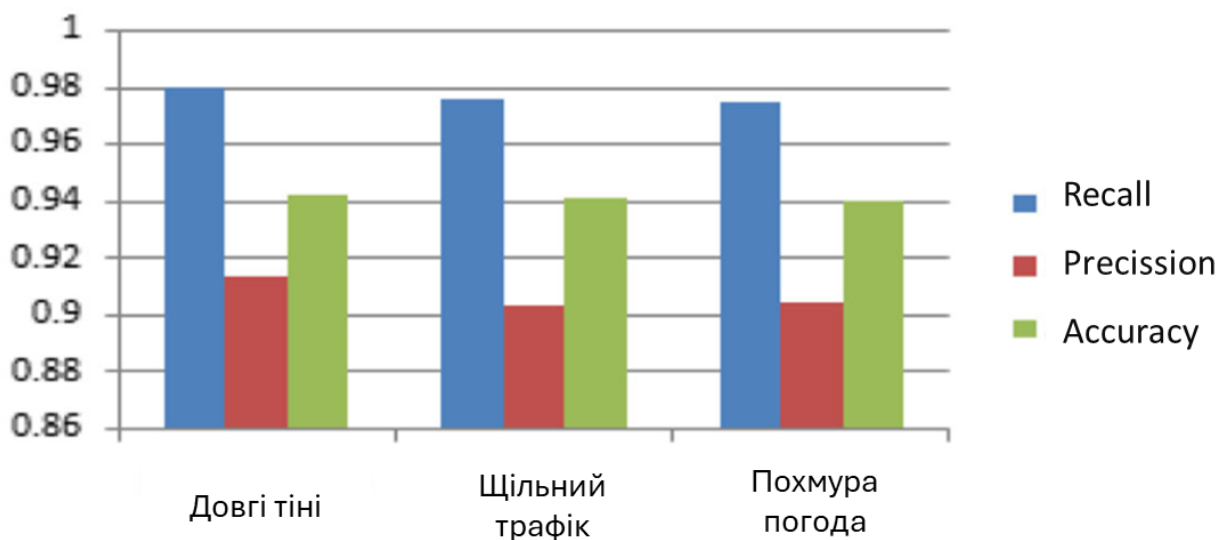


Рисунок 18. Аналіз результатів показників продуктивності при денному режимі освітлення

У таблиці 7 показано оцінку продуктивності за допомогою моделі класифікації YOLOv5 у денному режимі.

Таблиця 7.

Аналіз ефективності різних оціночних показників, що використовуються при розпізнаванні денного зору.

Денний режим виявлення	час обробки (сек)	Точність (Accuracy)	Повнота (recall)	Точність (Precision)
Виявлення при наявності довгих тіней	0,87	0,94	0,97	0,90
виявлення в умовах щільного руху	0,79	0,93	0,98	0,91
Виявлення в похмуру погоду	0,62	0,94	0,98	0,90
Загальна (середня) продуктивність в денному режимі	0,76	0,94	0,97	0,90

Дані в таблиці є результатом використуваних показників продуктивності. Дуже мало систем враховують такі фактори, як низька освітленість, затори та тіні від транспортних засобів. Це чітко показує, що запропонований підхід може виявити транспортні засоби і в несприятливих ситуаціях. Щоб система була ефективною і надійною, час обробки повинен бути невеликим, а точність повинна бути високою. Представлення гістограми на рис.4.4 показника продуктивності в денному режимі вказує на те, що час обробки виявився меншим для кожного випадку в пропонованій системі, а всі інші показники високі.

Системи нічного бачення як і раніше відчувають труднощі з виявленням транспортних засобів.



Запропонована методологія є новою, оскільки вона також розроблена та навчена виявляти рухомі транспортні засоби в нічний режим. Низька освітленість викликає ряд проблем при локалізації транспортних засобів, таких як неправильна класифікація, збільшення часу обчислення результатів і багато іншого. В роботі для оцінки продуктивності використовується нічне відео, що містить 1232 кадру роздільною здатністю  $426 \times 240$ . Візуальне уявлення показано на рис. 19.



Рисунок 19. Результати виявлення транспортного засобу в нічному режимі

На рисунку 19 показано виявлення транспортних засобів в умовах крайньої темряви, що підтверджує застосовність запропонованого методу. В ході дослідження була досягнута точність виявлення транспортних засобів на рівні 94,35%. Крім того, повнота, точність та вимірний час обчислень становили 99,24%, 90% та 0,39 сек відповідно.

Результати показників ефективності денного режиму були усереднені для всіх трьох випадків.

У таблиці 8 показано відсоток показників ефективності, що використовуються у запропонованій методології.

Для вирішення більшості проблем програмні компоненти системи були розроблені головним чином для денного режиму. Порівняно легко проводити дослідження при хорошому освітленні.

Виключно деякі системи були розроблені для роботи в декількох режимах (вдень і вночі).

Таблиця 8.

Загальний порівняльний аналіз показників продуктивності в денному і нічному режимах

Режим виявлення	час обробки (сек)	Точність (Accuracy)	Повнота (recall)	Точність (Precision)
День	0,76	94,06%	97,64%	90,01%
ніч	0,39	94,35%	99,24%	90%
загальна (середня) продуктивність моделі	0,59	94,20%	98,44%	90%

Запропоноване дослідження об'єднало методологію як для денного, так і для нічного бачення. Система загального призначення була сконструйована з використанням моделі YOLOv5, яка рідко використовується для виявлення транспортних засобів. Дані у всіх наведених вище таблицях показують, що продуктивність запропонованої системи не тільки краще для денного режиму, але і для умов низької освітленості, таких як ніч і похмура погода. Гістограма, що показує загальний сценарій, чітко пояснює, що для кожного режиму виявлення транспортних засобів застосована роботі модель дає найкращі результати. Загальна середня точність, досягнута в денному режимі, становить 94,06%, а в нічному режимі - 94,35%. Середня точність всієї моделі становить 94,20%. Таким чином, були досягнуті цілі щодо підвищення ефективності та швидкості виявлення об'єктів у відеопотоці в різних умовах освітленості, при щільному дорожньому русі і при наявності довгих тіней і інше (рис.20).

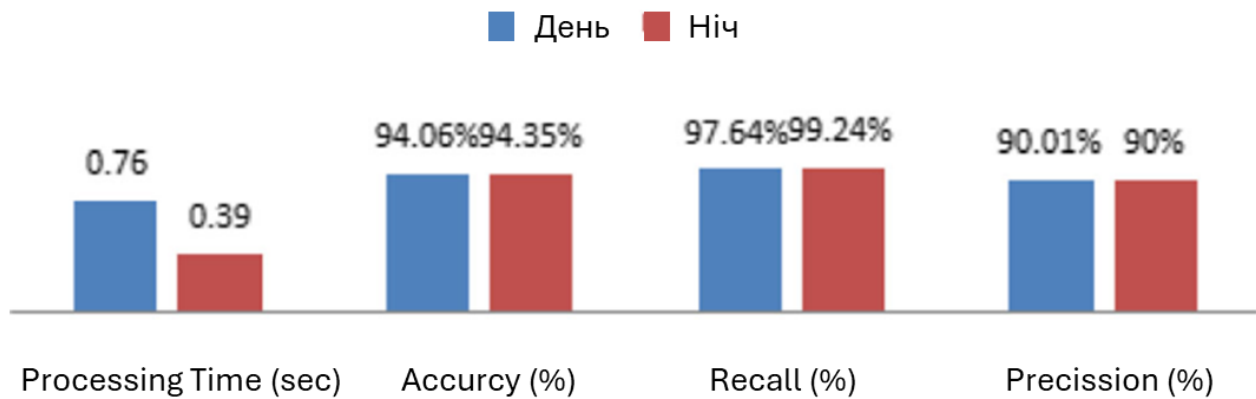


Рисунок 20. Порівняння продуктивності системи в денному і нічному режимах

Автоматичне виявлення транспортних засобів є найважливішим додатком інтелектуальної транспортної системи (ITS).

Впровадження її технологій на дорогах і магістралях стало надзвичайно необхідним у зв'язку зі збільшенням інтенсивності дорожнього руху. Ця система набула величезного значення в області планування і органів безпеки. Основна мета дослідження полягала в тому, щоб провести загальний огляд існуючої роботи в різних режимах, щоб поліпшити результати шляхом усунення недоліків. В роботі запропоновано використання моделі глибокого навчання YOLOv5, відому тим, що дозволяє класифікувати об'єкти за менший час обчислень. В роботі проведено дослідження запропонованого методу за допомогою набору інструментів глибокого навчання на різних відео, знятих у різних умовах дорожнього руху, таких як хмарна погода, яскраве сонце та нічний режим. Описана вище техніка добре працює зі складними сценами, такими як щільний рух, довгі тіні та умови слабого освітлення, такі як хмарна погода та виявлення нічного режиму. Продуктивність автоматичної системи виявлення транспортних засобів оцінюється з точки зору точності, точності, відгуку та часу обробки. В майбутньому можуть з'явитися більш складні і різноманітні набори даних, які доступні публічно і містять різні типи транспортних засобів на зображенні. Таким чином, майбутні дослідження повинні бути спрямовані на пошук всіх можливих підходів, які можуть забезпечити виявлення в режимі реального часу кожного типу транспортного засобу в складних умовах.

**Висновки.** Дослідження інтелектуальної системи виявлення об'єктів в реальному часі на базі YOLOv5 являє собою значний прогрес в області комп'ютерного зору і штучного інтелекту. YOLOv5, що володіє найсучаснішими можливостями виявлення об'єктів, відкрив численні можливості для додатків в режимі реального часу в різних областях, включаючи безпеку, спостереження, автономні транспортні засоби та багато іншого.

У ході цього дослідження ми вивчили функціональні та нефункціональні вимоги, а також системну архітектуру, необхідні для створення ефективної інтелектуальної системи виявлення об'єктів у режимі реального часу. В роботі підкреслено важливість досягнення високої точності, низької затримки та масштабованості.

Проаналізувавши результати, можна зробити висновок, що інтеграція новітніх технологій глибокого навчання у системи комп'ютерного зору відкриває нові можливості для підвищення ефективності виявлення об'єктів. Також було ідентифіковано, що ключовими параметрами оцінки ефективності таких систем є Recall, Accuracy, Precision та час обробки, що підтверджується виконаними експериментами.

З огляду на отримані дані, ми визначили, що подальші дослідження в області комп'ютерного зору та виявлення об'єктів повинні бути спрямовані на оптимізацію алгоритмів для забезпечення ще більшої швидкості та точності розпізнавання, особливо в складних умовах. Це зокрема важливо для розширення застосування таких систем в різних галузях, від контролю трафіку до розширених систем безпеки.

У підсумку, наше дослідження підкреслює значний потенціал використання алгоритмів комп'ютерного зору та глибокого навчання для вдосконалення систем виявлення об'єктів у відеопотоках, надаючи важливий внесок у розвиток технологій спостереження та аналітики.

## SECTION 9. INFORMATICS, COMPUTING AND AUTOMATION

DOI: 10.46299/ISG.2024.MONO.TECH.4.9.1

### 9.1 Autonomous grasping control via deep LLM in aerospace robotics

#### 9.1.1 Introduction

As the paradigms of aerospace robotics continue to evolve, the integration of advanced computational frameworks has heralded a transformative shift in the domain [309-312]. This shift, often aligned with the concept of the "Fourth Industrial Revolution," extends beyond terrestrial manufacturing to encapsulate the unique challenges and opportunities presented by extraterrestrial environments. The infusion of intelligent robotics into space exploration and operations seeks to optimize autonomous performance, enhance operational efficiency, and ensure reliability under the constraints of microgravity and environmental uncertainty.

While the advancements in aerospace automation represent a significant leap, they are merely the prelude to the full potential of this domain [313]. For decades, autonomous systems have been employed to mitigate the human workload and augment efficiency, particularly in mission-critical tasks such as satellite servicing [314], debris removal [315], and extraterrestrial construction [316]. However, traditional paradigms often rely on fixed operational frameworks, which limit adaptability and scalability in dynamic and unpredictable space environments.

This research pivots toward a more adaptive and context-aware framework, leveraging the capabilities of large language models (LLMs) integrated with advanced robotic control algorithms. By embedding these linguistic and cognitive models within the operational architecture of aerospace robotics, systems can achieve an unprecedented level of autonomy and contextual reasoning. Such integration not only facilitates precise navigation and manipulation tasks but also allows the robotic agents to infer, adapt, and respond to unforeseen contingencies effectively.

The rapid advancements in collaborative robotic systems, particularly those designed to operate in conjunction with other robots and human operators, further

underscore the relevance of this approach. In [317], the author represents a milestone in adaptive robotics, introducing robust decentralized control mechanisms that redefine the standards of satellite servicing, which bridges military objectives of resilience with commercial aspirations for sustainability and paving the way for innovative solutions in defense and aerospace industries, including pioneers like SpaceX. This next generation of aerospace robots, equipped with LLM-powered decision-making and control frameworks, embodies the confluence of advanced robotics, artificial intelligence, and space engineering, paving the way for more resilient and adaptive solutions in the ever-expanding frontier of space exploration [318].

The advent of autonomous systems, intelligent robotics, and machine learning has initiated a paradigm shift in the operational capabilities of aerospace robotics. For example, [319] introduces a paradigm shift in robotic control, integrating deep learning with robust MPC for high-DoF manipulators. It offers transformative solutions for science and technology, bridging gaps between adaptability, precision, and real-time learning, thereby setting a benchmark for innovation in aerospace, defense, and commercial robotics. Within the context of space exploration, robotics serves as a cornerstone for advancing mission-critical tasks such as object manipulation, satellite maintenance, and payload management under highly constrained and dynamic conditions. The inherent complexities of microgravity and the unpredictable nature of space necessitate novel methodologies that synergize advanced computational frameworks with adaptive robotic architectures [320-323].



Figure 1. A spacecraft module grappled by a Space Station's robotic arm<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup> The picture from Spaceflight Now, credit by Lockheed Martin

### **9.1.2 Related Work**

One of the foremost challenges in aerospace robotics lies in accurately manipulating objects within unstructured environments where gravitational forces are absent, and sensory data is often sparse or inconsistent [324]. In contrast to terrestrial robots, which rely heavily on predefined kinematic models and controlled environments, space robots must dynamically interpret their surroundings to identify, approach, and manipulate targets with precision. While traditional approaches such as stereoscopic vision, LiDAR, and motion planning algorithms provide a foundational framework, they often lack the adaptability required to operate seamlessly in the vast and volatile domain of space.

Addressing these challenges, [325] introduces an innovative methodology that uses Monte Carlo Tree Search (MCTS) framework tailored for strategic decision-making under computational constraints, providing pivotal insights into efficient algorithm design for aerospace robotics. The novel CPU and GPU-based implementations reveal groundbreaking improvements in simulation scalability and resource optimization, directly influencing applications like autonomous navigation, spacecraft servicing, and robotic decision-making in uncertain and dynamic environments. Its contribution establishes a benchmark for computational algorithms in aerospace, bridging innovative robotics solutions with real-time operational challenges. LLMs enable a deeper contextual understanding of the environment, facilitating dynamic decision-making and task prioritization in real-time [326]. By employing a six-degrees-of-freedom robotic manipulator augmented with YOLOv5 for precise object detection and backward projection for 3D spatial localization, the proposed framework ensures robust and efficient grasping in low-gravity scenarios [327-330].

This approach tackles the inverse dynamics problem by combining the analytical precision of deterministic models with the adaptive flexibility of data-driven reinforcement learning techniques [331]. Specifically, the trust region policy optimization (TRPO) algorithm is utilized to train the robotic system, enabling

autonomous computation of joint angles for efficient object manipulation. The proposed framework extends its applicability to multi-degree-of-freedom robotic systems [332], thereby providing a versatile solution tailored to the exigencies of aerospace environments.

In summary, the core contributions of this research are as follows:

- The integration of deep learning method based LLMs for enhanced contextual reasoning and decision-making in dynamic environments.
- The application of YOLO-v8 for real-time object detection and precise spatial localization.
- A robust inverse kinematics solution incorporating TRPO for autonomous manipulation of spaceborne objects.
- Validation of the methodology through simulations that demonstrate its superiority over state-of-the-art techniques, achieving high accuracy and reliability in task execution.

This study represents a significant advancement in the domain of aerospace robotics, paving the way for autonomous systems that operate with unprecedented precision and adaptability in the most challenging environments known to humankind.

### **9.1.3 Methodology**

In the realm of autonomous systems, the optimization of decision-making processes in dynamic and uncertain environments remains a paramount challenge, particularly in the context of aerospace robotics [333]. These systems must operate within the constraints of microgravity and the vast unpredictability of space, necessitating the integration of decentralized adaptive control method from [334] to deal with the uncertainty of the target payload in space environment. Reinforcement learning (RL), with its capacity to adapt and learn optimal policies through trial-and-error interactions, has emerged as a pivotal framework in addressing these complexities.

Policy-driven architectures, as central tenets of RL, aim to maximize cumulative rewards by iteratively refining value functions [335]. This approach facilitates the derivation of optimal actions from specific states, represented mathematically as  $\pi^*(s) \rightarrow a$ . RL paradigms are broadly categorized into value-based and policy-based



methods. While value-based techniques, such as Q-learning, focus on approximating the optimal action-value function  $Q^*(s, a)$  policy-based strategies directly converge on the optimal policy  $\pi^*(s)$  through gradient-based optimization.

In aerospace robotics, the ability to compute precise action-value functions is instrumental in overcoming challenges such as trajectory planning, object manipulation, and adaptive control under environmental uncertainties [334]. The integration of large language models (LLMs) into RL frameworks introduces a paradigm shift, enabling advanced contextual reasoning and enhanced generalization capabilities. This hybridized approach empowers robotic systems to synthesize high-level reasoning with low-level control, thereby enhancing their operational efficacy in space environments.

Central to this methodology is the Bellman equation, which provides the theoretical underpinning for value updates in RL. The iterative process, formalized as:

$$Q(s, a) \leftarrow Q(s, a) + \alpha \left[ r + \gamma \max_{a'} Q(s', a') - Q(s, a) \right]$$

allows for continuous refinement of action-value estimates, ensuring convergence to the optimal policy. Here,  $\alpha$  denotes the learning rate, while  $\gamma$  represents the discount factor, emphasizing the importance of future rewards. The error term,  $\Delta(s, a, r, s')$  encapsulates the discrepancy between current and target estimates, facilitating adaptive corrections.

By embedding LLMs within this RL-driven framework, aerospace robots can dynamically infer contextual nuances, predict task-specific requirements, and autonomously execute precision maneuvers[336]. This novel approach not only addresses the operational demands of space robotics but also establishes a foundation for next-generation intelligent systems capable of navigating the uncharted frontiers of space exploration[337-341].

To accelerate the learning process and enhance convergence efficiency, particularly in the domain of aerospace robotics, we leverage the Actor-Critic (AC) framework with a robust architectural enhancement. This involves the incorporation of target networks into both the actor and critic components, ensuring stability in the

learning trajectory [342]. By drawing conceptual inspiration from the Deep Q-Network (DQN) methodology, this approach is adapted to continuous action spaces, a critical requirement for high-precision tasks in the microgravity conditions of outer space[343-347].

In aerospace robotics, decision-making often involves navigating continuous state and action spaces, necessitating algorithms capable of adaptive and resilient learning. The Deep Deterministic Policy Gradient (DDPG) algorithm emerges as a quintessential off-policy strategy, designed to address these challenges effectively. This algorithm, underpinned by reinforcement learning principles, is synergized with large language models (LLMs) to augment contextual understanding and enable dynamic decision-making. By utilizing LLMs, the framework not only facilitates intuitive grasping of complex environmental nuances but also enhances policy optimization through semantic reasoning.

In this enhanced framework, target networks denoted as  $Q'(s', a, w')$  and  $\mu'(s', \theta')$  are systematically employed alongside the primary critic  $Q(s, a, w)$  and actor networks. The critic network minimizes the temporal difference error to stabilize value function estimation [348], while the actor network optimizes the policy by leveraging gradient ascent. The corresponding loss functions for the critic and actor networks are formulated as follows:

$$U_1 = [R + \gamma Q'(s', \mu'(s', \theta'), w') - Q(s, a, w)]^2$$

$$U_2 = \nabla_a Q(s, a, w) \nabla_\theta \mu(s, \theta)$$

Here,  $\gamma$  represents the discount factor for future rewards,  $R$  denotes the immediate reward signal, and  $\nabla$  signifies the gradient operator used to optimize network parameters.

The integration of LLMs within the DDPG framework redefines the operational paradigms for aerospace robotic systems, enabling precise and adaptive control in uncertain space environments. This approach not only addresses the inherent complexities of inverse kinematics in multi-degree-of-freedom manipulators but also demonstrates significant improvements in convergence rates and decision-making efficacy [349]. Through this confluence of RL and LLM technologies, the research sets

a new benchmark for intelligent robotic systems designed for extraterrestrial exploration and operations.

Numerous methodologies have been developed to enhance object manipulation tasks in robotic systems, yet the dynamic and unpredictable nature of the space environment poses unique challenges that transcend conventional techniques. Traditional frameworks primarily focus on robotic grasping and manipulation in terrestrial contexts, where the availability of structured environments simplifies the learning and execution processes. However, in aerospace robotics, the absence of gravitational forces, limited sensory feedback, and the high cost of computational errors necessitate an entirely novel approach to autonomous manipulation [350-355].

Recent advancements in reinforcement learning (RL) and large language models (LLMs) have opened new avenues for intelligent control in aerospace robots. LLMs, with their ability to interpret complex contextual data, enable space-based robotic systems to understand nuanced environmental dynamics and execute highly adaptive policies [356-359]. This integration of semantic reasoning with RL frameworks allows robots to make informed decisions in real-time, enhancing their ability to identify, localize, and interact with objects in microgravity.

While traditional deep reinforcement learning (DRL) strategies have demonstrated success in terrestrial applications, such as robotic grasping and stacking, their scalability to aerospace tasks remains constrained. Techniques such as self-supervised learning have been employed to teach robots object manipulation skills, leveraging mechanisms like laser-based sensors and stereoscopic vision. However, these approaches are inherently limited by their reliance on pre-defined training samples and static operational frameworks. By embedding LLMs into the learning architecture, robots can dynamically infer missing data points, predict the impact of external forces, and develop efficient manipulation strategies in unstructured space environments.

Critically, it is essential to acknowledge that the deterministic conditional mapping of outputs, as referenced in prior frameworks, constitutes an integral aspect of the hypothesized model within the Bayesian inference paradigm. Within this context,

the hypothesis  $\mathcal{H}$  asserts that, conditioned on the specified model parameters  $\theta$ , the outputs are unequivocally determined by the governing function  $f(x; \theta)$ . This deterministic perspective aligns with traditional methodologies in computational modeling but often fails to accommodate the inherent uncertainties prevalent in dynamic aerospace environments [360].

By embedding LLMs within the Bayesian framework, the deterministic output function is augmented to account for stochastic variations and environmental noise, thereby providing a robust solution for autonomous decision-making in aerospace robotics [353]. This hybrid approach not only enhances the reliability of robotic systems operating in extraterrestrial conditions but also paves the way for more intelligent and context-aware systems capable of navigating the complexities of space exploration.

$$S\left(r_{\mathcal{D}}^{(L)} \mid \theta, \mathcal{H}\right) = \prod_{\delta \in \mathcal{D}} \left\{ \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{\varepsilon}^2}} \exp \left[ -\frac{1}{4\sigma_{\varepsilon}^2} \left( u_{i;\delta}^{(L)} - f_i(x_{\delta}; \theta) \right)^2 \right] \right\}$$

In summary, this research establishes a transformative paradigm for aerospace robotic systems by integrating deep reinforcement learning with large language models. The proposed framework not only addresses the inherent challenges of space-based object manipulation but also sets a new benchmark for intelligent robotic systems in extraterrestrial exploration and operations.

#### 9.1.4 Results

Preliminary results indicate that our proposed framework significantly enhances the multi-drone system's ability to identify and manipulate unknown payloads. Notably, the cooperative learning paradigm improves overall performance compared to singular drone operations. In the experiment part, we test 7 different object for our space module in grasping mission the the torque and force applied by the robot arm as shown in Fig. 2. The trajectory tracking for our multi-drone system in 3D space is shown in Fig.3. The tracking error compared with the other two popular machine learning methods is shown in Fig.4. The training results relative to the different episodes based on our deep learning part as shown in Table I.

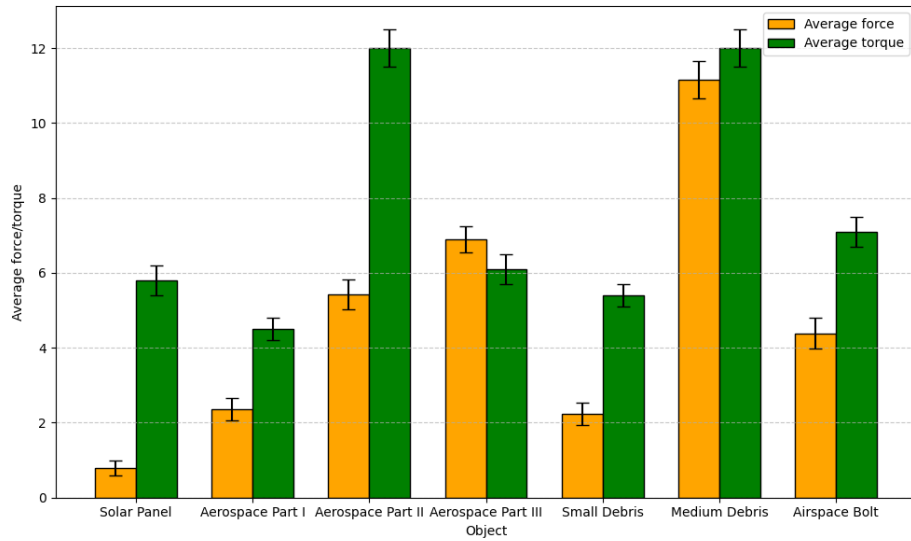


Figure 2. Loss value during the training process with our Deep Neural Network.

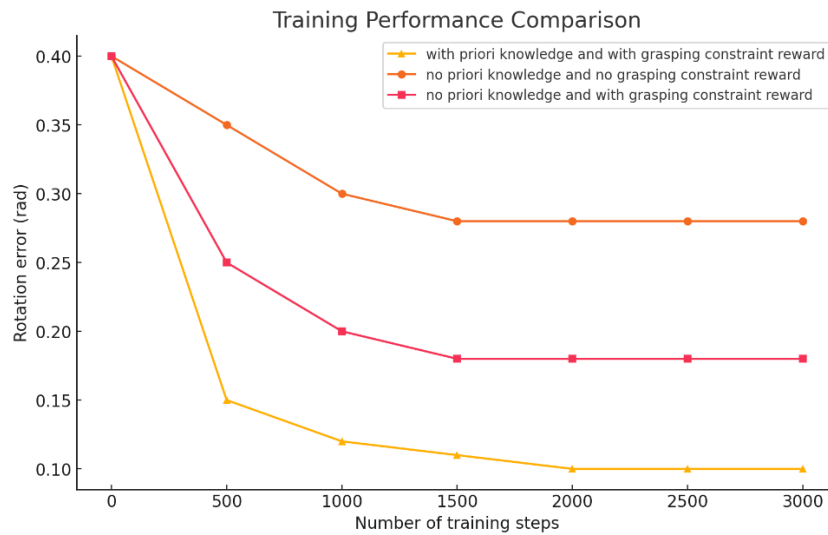


Figure 3. Trajectory tracking results for the end-effector of the robot arm on the space module in zero-gravity environment.

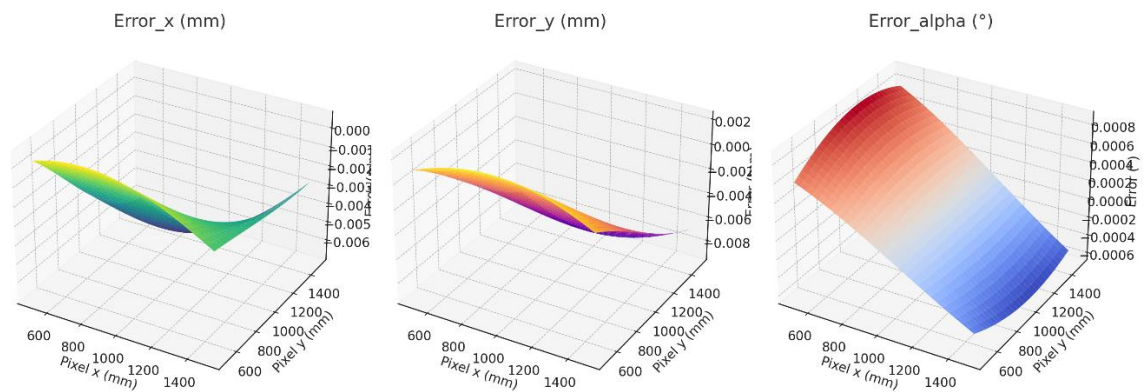


Figure 4. Transportation error for the base of the space module during the grasping task in space environment.

Table I: Accuracy of the grasping mission with deep learning.

Accuracy	100 Episodes	200 Episodes	300 Episodes	400 Episodes
Min	3%	24%	63%	93%
Max	22%	61%	89%	98%
Mean	12.5%	42.33%	76%	95.5%

### 9.1.5 Conclusion

This paper introduced a novel real-time whole-body obstacle avoidance framework tailored for multi-DoF redundant manipulators, with a particular focus on addressing challenges in dynamic environments. The proposed approach leverages a deformable dynamical system, where the original DS is adaptively modified through a combined modulation matrix accounting for the motion of surrounding obstacles. This deformation ensures that the end-effector can compute a trajectory capable of dynamically circumventing obstacles while achieving the desired target in real time. During trajectory tracking, null-space velocity control was employed to guarantee obstacle avoidance for the remaining non-end-effector components of the manipulator. By integrating deep learning into the framework, the system can further enhance adaptability, leveraging neural networks for real-time prediction of obstacle dynamics and optimizing control strategies in complex, high-dimensional spaces. The generalizability of the proposed approach allows its extension to manipulators with different degrees of freedom, making it particularly well-suited for applications in space environments, where precision, adaptability, and computational efficiency are paramount.

## **9.2 Моделювання інформаційно-комунікаційних систем методами математичного програмування**

При розробці інформаційно-комп'ютерних систем управління технічними процесами, при проектуванні роботи виробництва вирішується питання вибору найкращого варіанту роботи підприємства або певних процесів з точки зору мінімізації або максимізації значень певних показників. Моделювання виконання технічних процесів у системі починається з постановки задачі, у ході якої обирається цільова функція, як аналітичний запис функціональної залежності від певних показників. При математичній постановці задачі вказується яке значення функції цілі вважаються оптимальними. Також записуються певні умови та обмеження, які накладаються на аргументи функції, тобто на показники як параметри.

Якщо проблема вибору може бути вирішена багатьма шляхами, виникає необхідність порівняння варіантів, які обираються або проектуються, або рішень, що приймаються. Для цього необхідно мати можливість оцінити, які варіанти кращі, які гірші. Для порівняння варіантів, які оцінюються, користуються поняттям ефективності, що є узагальнюючою характеристикою об'єктів як систем, спрямованих на вирішення певних функцій.

Під ефективністю часто розуміють головну, визначальну характеристику або сполучення найбільш важливих техніко-економічних характеристик. У кібернетиці ефективність якісно повинна виражати пристосованість системи до функціонування за певним алгоритмом і кількісно повинна визначатися функцією, що виражає співвідношення між метою, що досягається, та витратами.

Якщо розглядати систему як об'єкт з точки зору системного аналізу, використовуючи методи системного аналізу, то увесь комплекс параметрів, що впливають на ефективність роботи системи можна поділити на показники, при збільшенні значень яких, збільшується значення функції ефективності, поліпшуються позитивні властивості технічної системи, та показники, збільшення значень яких, погіршує властивості системи, посилюються шкідливі

характеристики якості системи.

Показники першого класу назвемо позитивними, другого – негативними. До позитивних показників відносяться: у випадку технічних систем зв'язку - вірогідність і швидкість передачі інформації, надійність системи тощо, до негативних - апаратурна складність системи, її вартість, займана смуга частот тощо; у випадку промислових підприємств, що виготовляють продукцію – до позитивних показників відносяться: товарна продукція, сума прибутку; до негативних – кількість працівників, матеріальні витрати, основні виробничі фонди тощо.

Коли показник один, то вибрати просто: найкращій варіант той, для якого показник, значення якого бажано збільшити (позитивний), має більше числове значення, а показник, значення якого збільшувати небажано, (негативний) – має найменше значення. У загальному випадку позитивні і негативні показники є суперечливими і взаємозалежними: збільшення значення кількісної міри позитивних показників може привести до збільшення значення негативних показників. Протиріччя можуть мати місце як між позитивними і негативними показниками, так і між позитивними і позитивним чи між негативними і негативними.

Таким чином, ставиться задача формування критерію ефективності, що буде виражати узагальнено, в сукупності, характеристики об'єкту.

Введення понять позитивних і негативних показників дає можливість виразити весь комплекс показників системи одним відносно простим математичним співвідношенням з урахуванням коефіцієнтів важливості кожного показника. Дійсно, при такому визначенні показників можна вважати, що головна задача синтезу оптимальної системи полягає в досягненні найбільшої суми значень позитивних показників і найменшої суми значень негативних показників з урахуванням важливості кожного показника. Далі природно припустити, що з усіх варіантів, кожний з яких має як позитивні, так і негативні показники з різними значеннями, найкращим для спостерігача буде той варіант, що задовольняє заданим вимогам щонайкраще.



Таким чином, критерій має бути таким, щоб при загальному збільшенні показників, що виражають функцію цілі системи, значення критерію зростало, а при зростанні сукупних витрат – зменшувалося. При наведеному вище визначенні двох видів показників системи ціль, що досягається, (якість системи) характеризує сума значень позитивних показників, а витрати - сума значень негативних показників. Усі ці показники в усіх без винятку випадках можуть бути визначені кількісно.

Отже, весь комплекс показників системи необхідно задати одним сукупним параметром  $F_0$  – функцією ефективності, що виражається через значення позитивних  $X_i$  і значення негативних  $Y_j$  показників з урахуванням важливості кожного показника. При цьому сукупний параметр  $F_0$  повинний збільшуватися зі збільшенням суми значень позитивних показників  $\sum_{i=1}^n X_i$  і зменшуватися зі збільшенням суми значень негативних показників  $\sum_{j=1}^m Y_j$ , де  $m$  і  $n$  – кількість позитивних і негативних показників системи відповідно ( $i=1,2,\dots,n$ ;  $j=1,2,\dots,m$ ).

Оскільки кожен показник  $X_i$  і  $Y_j$  має різну важливість в системі заданих вимог (зовнішніх умов), то показники  $X_i$  і  $Y_j$  повинні бути перемножені на певні вагові коефіцієнти важливості  $a_i$  і  $b_j$  відповідно. Вагові коефіцієнти  $a_i$  і  $b_j$  виражають кількісну міру важливості позитивних і негативних показників відповідно.

Таким чином, сукупний параметр  $F_0$  можна представити наступною функцією:

$$F_0 = f\left(\sum_{i=1}^n a_i \cdot X_i, \sum_{j=1}^m b_j \cdot Y_j\right) \quad (1)$$

У цьому співвідношенні сума  $\sum_{i=1}^n a_i \cdot X_i$  являє собою кількісну величину

якості системи, а сума  $\sum_{j=1}^m b_j \cdot Y_j$  – сукупні витрати.

Це ж співвідношення виражає конкретне число й охоплює всі показники системи з урахуванням кількісної міри значень і важливості показників системи.

Критерій ефективності також може розглядатися як лінійна комбінація кількісних показників:

$$F = \sum_i a_i \cdot X_i - \sum_j b_j \cdot Y_j \quad (2)$$

де  $a$ ,  $b$  – вагові коефіцієнти показників.

В принципі, сформувавши функцію критерію ефективності можливо також в іншій формі, наприклад, просто, об'єднавши позитивні та негативні показники разом:

$$F = \sum_i a_i \cdot X_i \quad (3)$$

У якості методів прийняття математично-обґрунтованих техніко-економічних рішень використовуються методи лінійного програмування, вирішуються виробничі задачі симплекс-методом, перевіряються результати розрахунку на ЕОМ. Задачі лінійного програмування відносяться до класу задач, що називаються екстремальними. Екстремальні задачі – це задачі пошуку екстремуму (мінімуму або максимуму) певної функції  $L(x)$  на множині допустимих значень  $X$ , якій мають задовольняти точки  $x$ . Точка  $x$  в загальному випадку описується набором змінних  $x_i$ , тобто є вектором з координатами  $(x_1, x_2, \dots, x_n)$ . Точка  $x(x_1, x_2, \dots, x_n)$ , яка задовольняє обмеженням, що описують множину допустимих значень  $X$ , називається припустимим розв'язком екстремальної задачі. Функція  $L(x)$  називається функцією цілі або цільовою функцією (аналогічно критерію оптимізації при пошуку оптимального значення  $x$ ). Множина  $X$  також називається множиною припустимих розв'язків задачі. Припустимий розв'язок екстремальної задачі, на якому функція цілі досягає свого екстремуму, називається оптимальним розв'язком задачі або просто розв'язком.

Математична модель задачі лінійного програмування може бути записана в різному вигляді. Загальна задача лінійного програмування має наступний вигляд:

$$L(x) = \sum_{i=1}^n C_i x_i \rightarrow \min$$

$$\begin{cases} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n \leq b_1, \\ a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2n}x_n \leq b_2, \\ \vdots \\ a_{k1}x_1 + a_{k2}x_2 + \dots + a_{kn}x_n \leq b_k, \\ a_{k+1,1}x_1 + a_{k+1,2}x_2 + \dots + a_{k+1,n}x_n = b_{k+1}, \\ \vdots \\ a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \dots + a_{mn}x_n = b_m, \end{cases} \quad (4)$$

$$x_i \geq 0, \quad i = \overline{1, n}.$$

У середовищі MATLAB задачі лінійного програмування вирішуються за допомогою функції `linprog`. У даній роботі розглянемо її можливості.

Функція `linprog` вирішує задачу лінійного програмування у формі

$$\begin{aligned} C^T \cdot x &\rightarrow \inf, \\ A \cdot x &\leq b, \\ A1 \cdot x &= b1, \\ lb \leq x &\leq ub. \end{aligned} \quad (5)$$

Основними вхідними даними `linprog` є: вектор  $C$  коефіцієнтів цільової функції  $f$ , матриця обмежень-рівностей  $A$ , вектор правих частин обмежень-рівностей  $b$ , матриця обмежень-рівностей  $A1$ , вектор правих частин обмежень-рівностей  $b1$ , вектор  $lb$ , що обмежує план  $x$  знизу, вектор  $ub$ , що обмежує план  $x$  зверху. На виході функція `linprog` дає оптимальний план  $x$  завдання (1) та екстремальне значення цільової функції  $fval$ .

Розглянемо можливі варіанти вирішення задачі та знаходження

оптимального плану у системі комп'ютерної математики Matlab.

1. Задача має єдиний розв'язок.

$$f(x) = 4x_1 + 2x_2 + 3x_3 \rightarrow \inf,$$

$$2x_1 + x_2 + x_3 \geq 1, 3x_1 + x_2 - x_3 \geq -1, x_1 - x_2 + x_3 = 0,$$

$$0 \leq x_1 \leq 1, 0 \leq x_2 \leq 1, 0 \leq x_3 \leq 1.$$

Відповідний код у Matlab виглядає так:

```
clear all; close all;
```

```
clc % видаляються всі поточні змінні з пам'яті MATLAB, закриваються усі  
графічні вікна, очищується екран консолі
```

```
C = (4 2 3); % задається вектор довжини три
```

```
D = (2 1 1; 3 1 -1); % рядки матриці поділяються крапкою з комою
```

```
B = (1 -1];
```

```
Aeq = (1 -1 1); beq = (0);
```

```
lb = zeros (3,1); % задається нульовий вектор довжини три
```

```
ub = (1 1 1);
```

```
f = C; A = -D; b = -B; % з'являються знаки -, оскільки обмеження-нерівності
```

$Dx \geq B$  приводяться до вигляду  $-Dx \leq -B$

```
[x,fval] = linprog(f,A,b,Aeq,beq,lb,ub);
```

```
x
```

```
fval
```

Запустивши програму, отримаємо повідомлення

Optimization terminated.

```
x =
```

```
0.3333
```

```
0.3333
```

```
0
```

```
fval =
```

```
2
```

Додатково можна встановити початкове наближення  $x_0$ :

```
[x,fval] = linprog(f,A,b,Aeq,beq,lb,ub,x0)
```

Якщо жодного з вхідних параметрів немає, на його місце слід поставити квадратні дужки [], за винятком випадку, коли це останній параметр у списку. Наприклад, якщо потрібно вирішити задачу без обмежень-рівностей, в якій не встановлено початкове наближення, то оператор виклику функції `linprog` буде виглядати так:

```
[x,fval] = linprog(f,A,b,[],[],lb,ub)
```

(Квадратні дужки наприкінці списку, що відповідають початковому наближенню, не ставляться.)

За допомогою вхідного параметра `options` встановлюються деякі додаткові налаштування, зокрема вибирається алгоритм рішення. MATLAB вирішує завдання лінійного програмування двома способами: алгоритмом внутрішньої точки (Large-Scale Algorithm) та варіантом симплекс-метода (Medium-Scale Algorithm). За замовчуванням використовується алгоритм внутрішньої точки. Щоб вибрати симплекс-метод, потрібно написати

```
options = optimoptions('linprog','Algorithm','dual-simplex')
```

```
[x,fval] = linprog(f,A,b,Aeq,beq,lb,ub,options)
```

Розберемося із вихідними даними. MATLAB дозволяє виводити інформацію про те, як завершилося рішення задачі. За це відповідає параметр `exitflag`. Якщо значення `exitflag` дорівнює 1, то знайдено розв'язання задачі, якщо дорівнює 0, то перевищено допустиме число ітерацій, якщо  $-2$  — множина планів задачі порожня, якщо  $-3$  — цільова функція не обмежена знизу на множині планів. Інтерпретація інших значень параметра `exitflag` наведена у MATLAB Help.

Для симплекс-метода допустима кількість ітерацій `MaxIterations` за замовчуванням у 10 разів більша за кількість змінних. Можна змінити значення, щоб встановити допустиме число ітерацій рівним, наприклад, 10, необхідно написати

```
options = optimoptions('linprog','Algorithm','dual-simplex','MaxIterations',10);
```

```
[x,fval] = linprog(f,A,b,Aeq,beq,lb,ub,options)
```

Якщо після виконання десятої ітерації рішення не буде знайдено, параметр

exitflag стане нульовим і на екрані з'явиться повідомлення

Maximum number of iterations exceeded; increase options.MaxIteration.

Параметр output містить інформацію про процес оптимізації, зокрема, число ітерацій (iterations) та алгоритм (algorithm). Інші поля параметра output описані у MATLAB Help. Запустимо з даними прикладу 1 наступну програму:

```
options = optimoptions('linprog','Algorithm','dual-simplex','MaxIterations',10);
```

```
[x,fval,exitflag,output] = linprog(f,A,b,Aeq,beq,lb,ub,options);
```

```
exitflag
```

```
output.iterations
```

```
output.algorithm
```

На виході отримаємо: Optimization terminated.

```
exitflag =
```

```
1
```

```
ans =
```

```
2
```

```
ans =
```

```
'dual-simplex'
```

Це означає, що симплекс-метод успішно завершив роботу, для знаходження рішення знадобилося дві ітерації.

2. При розв'язанні задачі лінійного програмування можливі три виходи з процесу: знайдено розв'язання задачі, множина планів порожня, цільова функція не обмежена знизу на множині планів. Продемонструємо ці варіанти на прикладах.

Вирішимо в MATLAB задачу лінійного програмування

$$f(x) = 4x_1 + x_2 \rightarrow \inf,$$
$$x_1 + x_2 \geq 2, x_1 - x_2 \geq 1, x_1 \geq 0, x_2 \geq 0.$$

Відповідна програма виглядатиме так:

```
clear all; close all; clc
```

```
C = (4 1); D = (1 1; 1 -1); B = (2 1);
```

```
lb = zeros (2,1); f = C; A = -D; b = -B;
```

```
options = optimoptions('linprog','Algorithm','dual-simplex');
```

```
[x,fval] = linprog(f,A,b,[],[],lb,[],options);
```

Optimal solution found.

```
[x,fval,exitflag] = linprog(f,A,b,[],[],lb,[],options);
```

Optimal solution found.

```
x =
```

```
1.5000
```

```
0.5000
```

```
fval =
```

```
6.5000
```

```
exitflag =
```

```
1
```

```
[x,fval,exitflag,output] = linprog(f,A,b,[],[],lb,[],options)
```

Optimal solution found.

```
x =
```

```
1.5000
```

```
0.5000
```

```
fval =
```

```
6.5000
```

```
exitflag =
```

```
1
```

```
output =
```

```
struct with fields:
```

```
iterations: 2
```

```
constrviolation: 0
```

```
message: 'Optimal solution found.'
```

```
algorithm: 'dual-simplex'
```

```
firstorderopt: 0
```

```
options = optimoptions('linprog','Algorithm','interior-point');
```

```
[x,fval,exitflag,output] = linprog(f,A,b,[],[],lb,[],options)
```

Minimum found that satisfies the constraints.

Optimization completed because the objective function is non-decreasing in feasible directions, to within the function tolerance, and constraints are satisfied to within the constraint tolerance.

x =

1.5000

0.5000

fval =

6.5000

exitflag =

1

output =

struct with fields:

iterations: 3

message: 'Minimum found that satisfies the constraints. Optimization completed because the objective function is non-decreasing in feasible directions, to within the function tolerance, and constraints are satisfied to within the constraint tolerance.'

algorithm: 'interior-point'

constrviolation: 0

firstorderopt: 1.7671e-07

options = optimoptions('linprog','Algorithm','dual-simplex','MaxIterations',10);

[x,fval,exitflag,output] = linprog(f,A,b,[],[],lb,[],options)

Optimal solution found.

x =

1.5000

0.5000

fval =

6.5000

exitflag =



1

output =

struct with fields:

iterations: 2

constrviolation: 0

message: 'Optimal solution found.'

algorithm: 'dual-simplex'

firstorderopt: 0

3. Вирішимо в MATLAB задачу лінійного програмування

$$f(x) = x_1 + x_2 \rightarrow \inf,$$

$$-x_1 - x_2 \geq -1, x_1 + 4x_2 \geq 8, x_1 \geq 0, x_2 \geq 0.$$

Наведемо результат роботи відповідної програми:

$$C = (1 \ 1); D = (-1 \ -1; 1 \ 4); B = [-1 \ 8];$$

$$lb = [0 \ 0];$$

$$f = C; A = -D; b = -B;$$

```
options = optimoptions('linprog','Algorithm','dual-simplex');
```

```
[x,fval] = linprog(f,A,b,[],[],lb,[],options);
```

No feasible solution found.

Linprog stopped because no point satisfies the constraints.

Exiting: The constraints are overly stringent; no feasible starting point found.

Множина планів завдання порожня.

4. Вирішимо в MATLAB задачу лінійного програмування

$$f(x) = -x_1 - 3x_2 \rightarrow \inf, 2x_1 - x_2 \geq 0, -x_1 + x_2 \geq -1, x_1 \geq 0, x_2 \geq 0 \quad (4)$$

Запустивши програму, яка вирішує завдання (4), отримаємо:

Exiting: The solution is unbounded and at infinity;

x =

1.0e+016\*

1.0000

2.0000

fval =

-7.0000e+016

exitflag =

-3

Цільова функція завдання (4) не обмежена знизу на багатьох планах.

Таким чином, ми розглянули вирішення задач лінійного програмування у системі комп'ютерної математики Matlab, провівши дослідження для усіх можливих варіантів рішення.

## **9.3 Pedagogy multi-drone system manipulation of unknown object using deep learning**

### **9.3.1 Introduction**

Over the past decade, unmanned aerial vehicles (UAVs)—commonly known as drones—have gained widespread attention in various sectors, including agriculture, delivery services, disaster management, and military applications [366-369]. The capability to autonomously manipulate payloads expands the functionality of drones significantly. However, manipulating unknown payloads presents unique challenges that demand sophisticated solutions. This paper focuses on a multi-drone system's ability to intelligently perceive and manipulate unknown payloads using advanced deep-learning algorithms [370]. The motivations behind this research stem from the increasing need for autonomous systems capable of efficiently performing tasks in unpredictable environments [371-373].

One of the most significant advantages of multi-drone systems is their enhanced coordination and efficiency. The ability for multiple drones to work in tandem allows them to cover larger areas more effectively than a single drone could manage alone. For instance, in aerospace applications, a fleet of drones can simultaneously monitor vast fields, gathering data on crop health [374], soil conditions, and pest infestations in real time. This collective effort not only enriches data collection but also minimizes the time taken to achieve comprehensive monitoring, thus empowering agent to make timely interventions that can enhance yields [375]. Furthermore, deep learning algorithms can optimize the flight paths of multiple drones, leading to reduced fuel consumption and longer operational durations. By analyzing historical data and real-time conditions, these algorithms can calculate the most efficient routes and adjust them dynamically, all while considering factors such as wind patterns and battery life [376]. This optimization is crucial in emergency scenarios, where time is of the essence. Improved communication between drones enables them to instantly share data, leading to faster response times in emergencies, such as natural disasters or search

and rescue missions. For example, a coordinated multi-drone response can quickly cover and assess extensive disaster-struck areas, providing critical situational awareness to first responders. Hence, integrating deep learning in multi-drone systems significantly enhances their operational efficiency and effectiveness, ultimately leading to better outcomes across various applications[377-380].

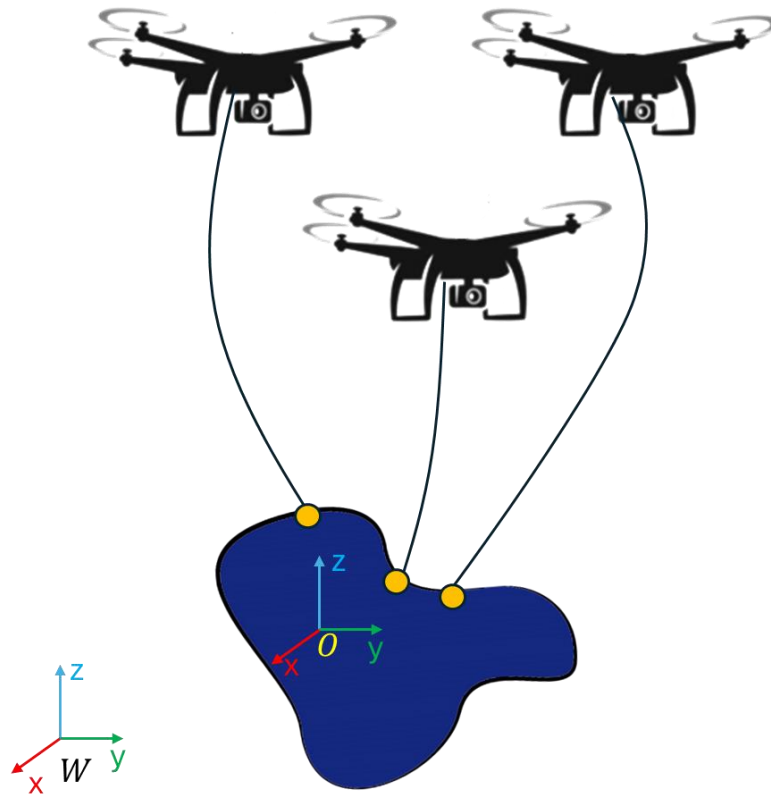


Figure 1. Multi-drone system lift object to transport to a target place.

### 9.3.2 Related Work

Building upon previous research in single-drone manipulation systems, where the payloads are typically known beforehand, much of the work has centered around model predictive control (MPC) and heuristic algorithms. These approaches have demonstrated effectiveness in controlled environments, but their adaptability to scenarios involving unknown or dynamic payloads is limited. As drones transition from single-agent systems to more complex multi-agent configurations, the challenges associated with cooperative payload manipulation become increasingly pronounced.

Multi-drone systems have been extensively studied for tasks such as routing, coordination, and coverage, yet the integration of sophisticated mechanisms for payload interaction remains underdeveloped.

Deep learning has revolutionized multiple domains, particularly in fields like computer vision and natural language processing, where convolutional neural networks (CNNs) and recurrent neural networks (RNNs) have set new benchmarks in performance. In robotics, these architectures have been pivotal in advancing perception tasks, including object recognition, scene understanding, and even autonomous navigation. Despite these advancements, applying deep learning to the specific challenge of payload manipulation within multi-drone systems is still in its early stages. The inherent complexity of dynamic payload manipulation, especially when multiple drones are involved, poses unique challenges that traditional deep-learning models are only beginning to address.

Reinforcement learning (RL) offers a promising avenue for overcoming these challenges, as it allows agents to learn optimal behaviors through interaction with their environment. In the context of multi-drone systems, multi-agent reinforcement learning (MARL) extends this capability by enabling multiple agents to learn cooperatively. This collaborative learning framework is crucial for tasks that require a high degree of coordination, such as the joint manipulation of an unknown or shifting payload. While MARL has shown potential in various cooperative robotic tasks, its application to dynamic payload manipulation scenarios is still largely unexplored. The ability of MARL to adapt to the real-time demands of payload manipulation, where conditions and requirements can change rapidly, makes it an exciting area for future research.

Emerging research is beginning to address these gaps, exploring how deep learning and MARL can be leveraged together to enable more intelligent and adaptive multi-drone systems. By integrating advanced perception capabilities with learning-based control strategies, these systems could potentially handle the complexities of dynamic payloads in a way that traditional methods cannot. As research in this area progresses, we can anticipate significant advancements in deploying multi-drone

systems for complex, real-world tasks, pushing the boundaries of what is currently achievable in aerial robotics.

### 9.3.3. Methodology

In this approach, each drone within the fleet is systematically registered onto a blockchain network, ensuring that all essential information is securely stored and easily accessible. The metadata associated with each drone includes a unique identifier detailing its specific operational capabilities, such as payload capacity, battery life, sensor accuracy, and current operational state. To maintain the integrity of this data, a deep learning-based classification algorithm is employed to verify and validate the reported capabilities of each drone. This algorithm analyzes the drone's performance metrics and cross-references them with the metadata to confirm accuracy, thereby ensuring that the information recorded on the blockchain is both precise and reliable.

This verification process, illustrated in Fig. 2, is a critical step in the workflow as it underpins the trustworthiness of the entire system. By ensuring that only validated data is stored on the blockchain, the system can confidently proceed with mission planning and execution, knowing that decisions are based on accurate, up-to-date information. This layer of verification enhances the reliability of the individual drones and contributes to the overall robustness of the fleet's operations, which is vital for the success of complex missions.

To formalize the deep learning-based method used for multi-robot (multi-drone) transportation tasks, let's define the necessary components and the equations involved. The deep learning method, in this context, is focused on classifying and validating the capabilities of each drone in the fleet to ensure successful transportation tasks. Let each drone  $i$  in the fleet be represented by a feature vector  $\mathbf{x}_i$  that encapsulates its operational capabilities:

$$\mathbf{x}_i = \begin{pmatrix} C_i \\ B_i \\ S_i \\ \mathbf{s}_i \end{pmatrix}$$

Where  $C_i$  represents the payload capacity of drone  $i$ ,  $B_i$  represents the battery life of drone  $i$ ,  $S_i$  represents the sensor accuracy of drone  $i$ ,  $\mathbf{S}_i$  represents the current state of drone  $i$ , which may include parameters like position, velocity, and operational status.

A deep neural network (DNN)  $f(\mathbf{x}_i; \theta)$  is trained to classify the operational state and capabilities of the drones. The function  $f$  maps the input feature vector  $\mathbf{x}_i$  to a classification output  $\hat{y}_i$ , which represents the validated capability status:

$$\hat{y}_i = f(\mathbf{x}_i; \theta)$$

Where  $\theta$  represents the parameters of the neural network,  $\hat{y}_i$  is the predicted class label for drone  $i$ , indicating whether the capabilities are valid (1) or not valid (0).

The deep learning model is trained using a loss function  $\mathcal{L}$  that measures the difference between the predicted label  $\hat{y}_i$  and the true label  $y_i$  (ground truth):

$$\mathcal{L}(\theta) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \ell(y_i, \hat{y}_i)$$

Where  $N$  is the number of drones in the training set,  $\ell(y_i, \hat{y}_i)$  is the loss function (e.g., cross-entropy loss) for a single drone  $i$ .

Once the model is trained, it is used to validate the capabilities of each drone before the information is recorded on the blockchain. The final validation for drone  $i$  can be expressed as:

$$\text{Validation Status} = \begin{cases} \text{Record on Blockchain} & \text{if } \hat{y}_i = 1 \\ \text{Reject} & \text{if } \hat{y}_i = 0 \end{cases}$$

This equation dictates that only drones classified with valid capabilities ( $\hat{y}_i = 1$ ) will have their data recorded on the blockchain, ensuring the accuracy and reliability of the operational data.

The feature vector  $\mathbf{x}_i$  represents each drone's operational capabilities and current state, which are essential for the transportation task. The deep neural network  $f(\mathbf{x}_i; \theta)$  is used to classify whether these capabilities are valid based on the training it received with a labeled dataset. The loss function  $\mathcal{L}(\theta)$  helps optimize the network during training by minimizing classification errors.

Once trained, this deep learning model becomes an integral part of the verification process, ensuring that only drones with validated and reliable capabilities store their data on the blockchain. This process safeguards the integrity of the entire multi-robot transportation system, ensuring that all mission-critical operations are based on accurate and trustworthy data.

Once the drones are registered, the system transitions to task allocation. Here, a reinforcement learning (RL) framework [381] is leveraged to assign specific roles to each drone, such as gripping, stabilizing, or monitoring. The RL model is trained to maximize efficiency by considering factors like drone capabilities, current energy levels, and the object's characteristics [382]. The RL algorithm iteratively refines task assignments to minimize energy consumption and ensure balanced workload distribution among drones [383]. The algorithm design is done by enhancing overall mission efficiency. Our algorithm design is shown in Fig.3.

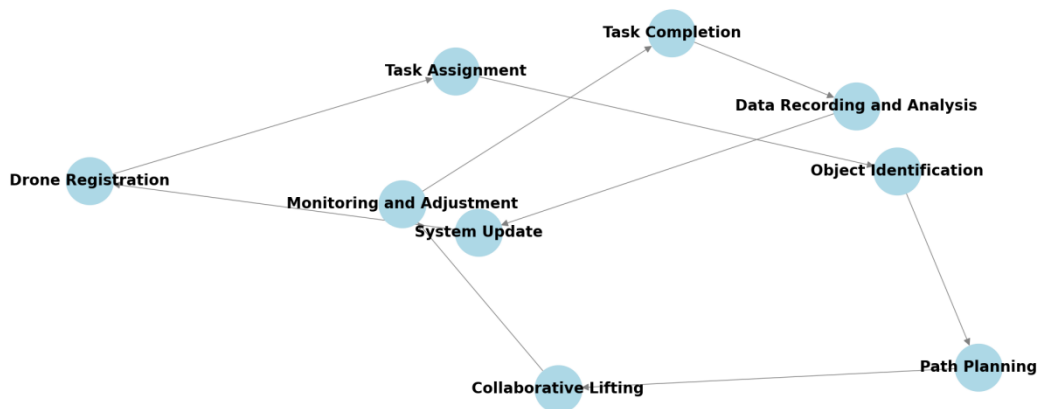


Figure 2. Algorithm design for Deep Learning in multi-drone lifting task.



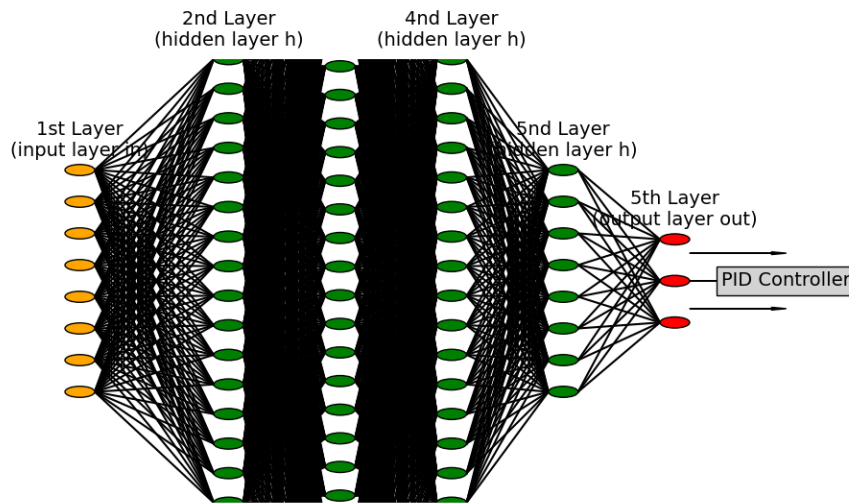


Figure 3. Deep Neural network structure in low-level control.

### 9.3.4 Results

Preliminary results indicate that our proposed framework significantly enhances the multi-drone system's ability to identify and manipulate unknown payloads. Notably, the cooperative learning paradigm improves overall performance compared to singular drone operations. The trajectory tracking for our multi-drone system in 3D space is shown in Fig.4. The tracking error compared with the other two popular machine learning methods is shown in Fig.5.

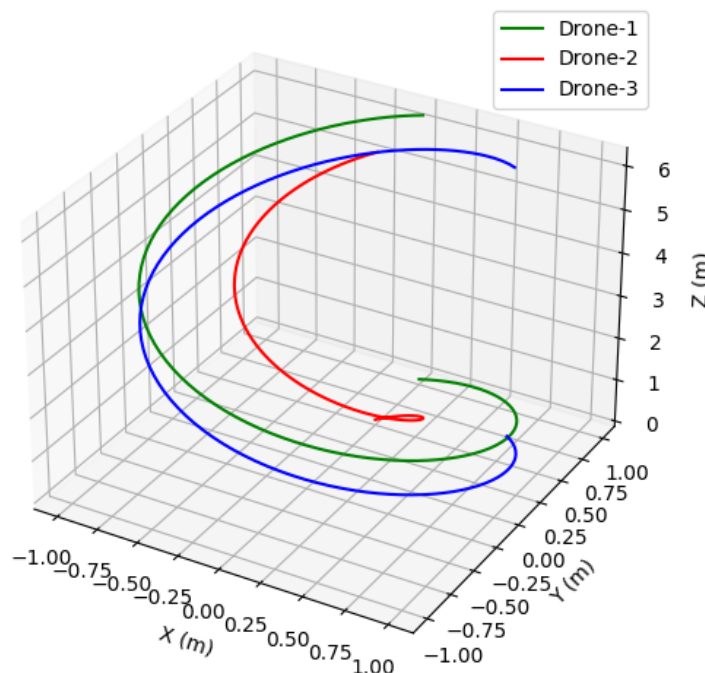


Figure 4. Trajectory tracking results for three drones during our transportation task.

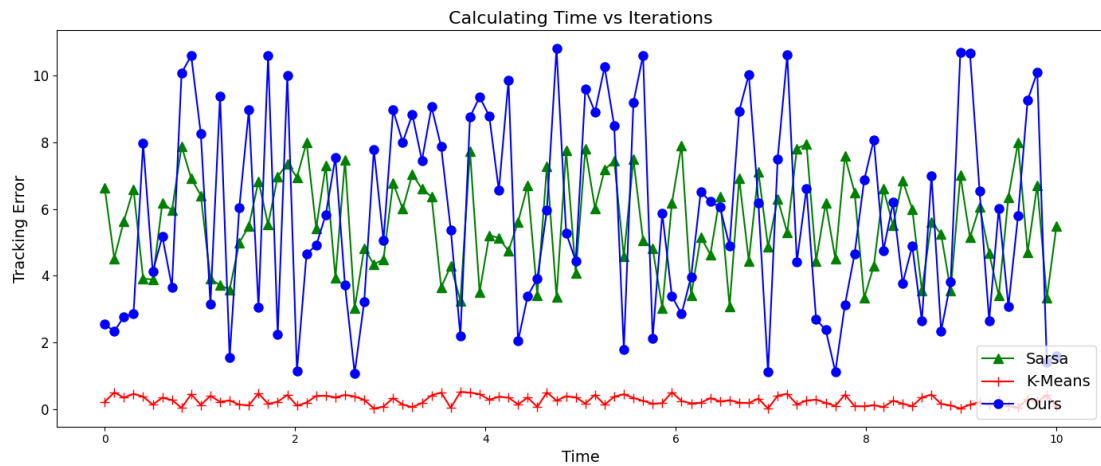


Figure 5. Tracking errors with other two popular methods during the same task.

### 9.3.5 Conclusion

This paper presents a novel multi-drone system capable of manipulating unknown payloads by leveraging deep learning and reinforcement learning techniques. Our findings indicate significant potential for various applications that require autonomous payload manipulation, underscoring the need for further research and development in this domain.

## **9.4 Deep learning-driven real-time whole body obstacle avoidance for multi-dof redundant manipulator in space**

### **9.4.1 Introduction**

Redundant serial manipulators have found extensive utility in diverse domains, including industrial automation, precision manufacturing, and service robotics, due to their exceptional dexterity and adaptability. In operational scenarios, such manipulators are frequently required to navigate complex environments populated with dynamic entities, such as human operators, cooperative robotic systems, and other autonomous agents. These entities, collectively considered obstacles, may exhibit stationary or non-stationary characteristics, further complicating motion planning. In extraterrestrial environments, such as space missions [384], the manipulators face additional constraints [385], including microgravity and limited computational resources, necessitating advanced methodologies for collision avoidance. The integration of deep learning algorithms enables predictive modeling of obstacle trajectories, facilitating anticipatory and adaptive motion strategies. Ensuring collision-free operation across the entire manipulator structure is critical for task execution [386], such as object manipulation or assembly in microgravity. Consequently, real-time whole-body obstacle avoidance is indispensable for redundant manipulators to maintain operational efficacy in such challenging and dynamic contexts.

To address the intricate challenge of obstacle avoidance in robotic systems, an array of methodologies has been developed over the years. Broadly, these techniques can be categorized into reactive motion generation frameworks and trajectory planning paradigms. Trajectory planning approaches, exemplified in works such as [387], leverage sophisticated planning algorithms to circumvent obstacles. Nevertheless, the computational complexity associated with these methods imposes significant constraints, rendering them impractical for real-time applications, particularly in scenarios requiring instantaneous decision-making. [388] come up with a novel self-adaptive algorithm for robots to adapt itself in various external environment, which

pave the foundation of self-adaption in robotics and can be extended in space repairing missions. This limitation becomes even more pronounced in space environments, where real-time obstacle avoidance must contend with additional challenges such as microgravity dynamics and constrained onboard computational resources. By integrating deep learning techniques, predictive obstacle modeling and adaptive motion strategies can be realized, significantly mitigating the computational burden and enabling seamless real-time operation in such highly dynamic and resource-constrained domains.

Reactive motion generation methodologies have been developed as an alternative to path planning approaches to facilitate real-time obstacle avoidance. Techniques such as the vector field histogram [389] and the curvature-velocity method [390] enable rapid evasion of obstacles. However, these methods often yield locally optimal solutions and cannot always guarantee a globally feasible trajectory. A groundbreaking decentralized adaptive control method for space robotic systems was proposed by [391], addressing the critical challenges of space servicing and repair under the uncertainty of aerospace accessories on satellites or spacecraft. This work represents a significant milestone in the development of adaptive servicing strategies, laying a robust foundation for tackling complex tasks in unstructured and unpredictable space environments. Notable advancements include the attractor dynamics approach in [392] and dynamic potential fields proposed by [393], among others. The APF method models obstacles as sources of repulsive forces, designed to repel the system away from collisions. However, these forces must be carefully defined to avoid local minima, a common limitation of APF methods.

To address the local minima issue, a novel monte Carlo tree search approach in [394] was introduced, combining reactive techniques with path planning algorithms to ensure collision-free navigation. The harmonic potential method [395] emerged as another widely adopted alternative [396], leveraging harmonic potential functions to mitigate local minima challenges. Inspired by fluid dynamics around impenetrable barriers, a novel dynamical systems (DS)-based method was proposed in [397]. This approach employs a modulation matrix for obstacles, deforming the original DS to

compute an alternative trajectory that circumvents obstacles. Despite its efficacy, the DS-based method is inherently limited to convex obstacles. Extensions by Huber et al. [398] enabled the avoidance of concave obstacles, albeit restricted to linear DS, thereby limiting applicability to nonlinear dynamical systems.

In more recent developments, sensor-based obstacle representations, such as point clouds, have been incorporated into DS-based approaches [399], enabling adaptive and environment-aware obstacle avoidance. However, these methods face significant challenges in complex environments like space, where the dynamic and computational constraints demand more sophisticated solutions. By integrating deep learning, these reactive motion generation approaches can leverage neural networks to predict obstacle dynamics and adaptively optimize trajectories, offering a pathway to overcome limitations associated with nonlinearity, local minimum, and real-time performance in resource-constrained domains such as extraterrestrial environments.

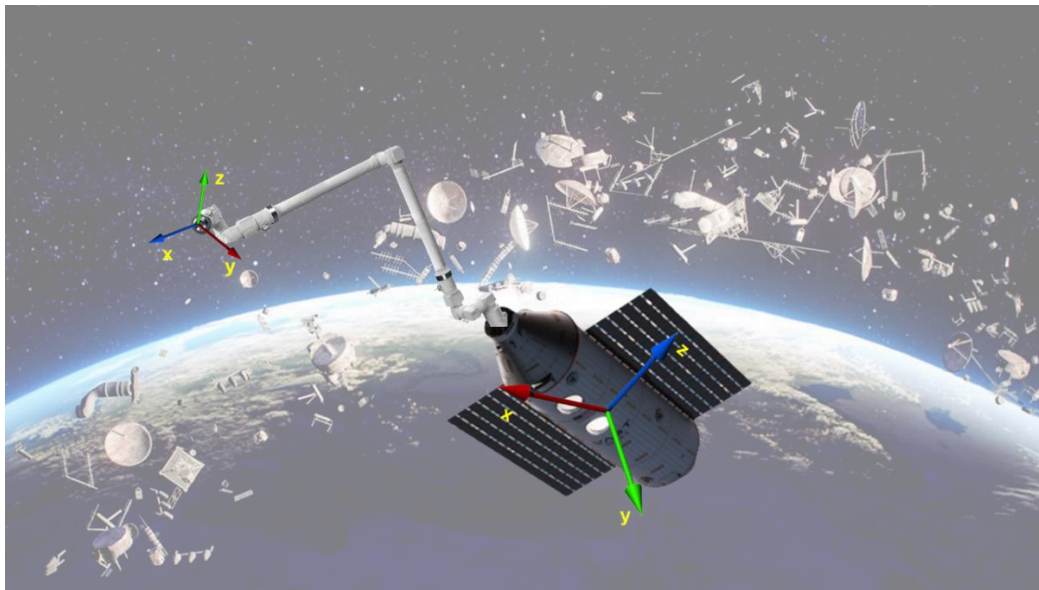


Figure 1. A Space module install a multi-dof robot arm in space environment.

### 9.4.2 Related Work

Obstacle avoidance strategies for redundant manipulators have been extensively investigated in the literature [400]. Numerous methodologies leverage null-space velocity control, wherein a velocity vector directed away from the obstacle is assigned to the manipulator's point of closest proximity to the obstacle [401]. Additionally, task-priority frameworks [402] have been proposed, which prioritize the execution of

primary objectives, such as obstacle avoidance, only when deemed necessary. While these approaches offer computational efficiency, they are inherently constrained by certain simplifying assumptions, namely, that the manipulator's end-effector follows a predetermined global trajectory and that obstacles remain static. These limitations render such methodologies unsuitable for executing complex tasks, such as dynamically grasping objects in environments with multiple moving obstacles.

In the context of extraterrestrial operations, such as those encountered in space robotics, the complexities escalate further due to the presence of microgravity and rapidly changing obstacle dynamics. To overcome these challenges, deep learning paradigms can be integrated into null-space and task-priority frameworks to enhance their adaptability. By leveraging neural networks, the system can predict obstacle motion trajectories and dynamically adjust the end-effector's path in real time. This fusion of deep learning with classical control strategies enables manipulators to handle more sophisticated scenarios, such as interacting with multiple non-stationary obstacles, while maintaining compliance with mission-critical constraints in space environments.

As discussed previously, while numerous advanced obstacle avoidance techniques have been proposed, only a limited number of them can guarantee real-time whole-body obstacle avoidance (RWOA) for redundant manipulators, particularly when encountering moving obstacles during task execution. Certain approaches, such as those outlined in [403-405], are specifically tailored for obstacle avoidance at the manipulator's end-effector, whereas other methods, including those described in [406], address avoidance for the non-end-effector components—essentially the manipulator's body excluding the end-effector [407]. Moreover, many of these methods operate under the simplifying assumption that obstacles remain stationary, rendering them unsuitable for dynamic and highly unpredictable environments.

To address the RWOA challenge comprehensively, this study introduces a novel framework that combines dynamical systems (DS) with null-space velocity control. The proposed methodology is specifically designed to handle real-time obstacle avoidance across the entirety of a manipulator's structure, ensuring collision-free

motion in the presence of moving obstacles. Given the widespread deployment of 7-DOF redundant manipulators in both terrestrial and extraterrestrial applications, this work focuses on manipulators with such configurations. Additionally, by incorporating deep learning into the DS-based framework, the proposed approach leverages neural networks for obstacle trajectory prediction, enabling anticipatory adjustments and adaptive control. This integration enhances the method's applicability to complex environments, such as space missions, where dynamic obstacles, microgravity conditions, and computational constraints pose significant challenges to traditional control strategies..

### **9.4.3 Methodology**

In this study, we assume the presence of  $N$  discrete, dynamically moving convex obstacles surrounding the manipulator. Considering that manipulators predominantly operate within the Cartesian space, the obstacles under consideration are modeled as three-dimensional entities. In scenarios involving interconnected obstacles, they can be approximated collectively as a singular convex obstacle, as discussed in [408-412]. While non-convex objects, such as brushes or lamps, are frequently encountered in practical applications, a Bounding Volume (BV) approach [413] can be employed to encapsulate these irregular shapes within three-dimensional convex envelopes. This abstraction not only simplifies the computational complexity but also ensures that obstacle representations remain compatible with existing motion planning algorithms. To enhance adaptability in dynamic and space-specific environments, deep learning algorithms can be incorporated to predict obstacle motion patterns and refine the generation of convex representations in real time, thereby facilitating collision-free manipulator operation under complex spatial constraints.

The Newton-Euler formalism is utilized to derive the dynamic model of the space robotic system [414]. This methodology enables a comprehensive and intuitive analysis of forces and moments acting on the system and can be effectively extended to complex systems that incorporate closed-loop geometric constraints. The resulting dynamic equations account for the intricate interactions between the robotic links and

the spacecraft base, providing a detailed representation of the system's behavior under external and internal forces. By integrating deep learning techniques, the predictive capabilities of the dynamic model can be enhanced, allowing for real-time adaptation to dynamic environments and unforeseen disturbances, which are critical in space missions characterized by microgravity and constrained computational resources. The equations governing the dynamics of the robotic links and the spacecraft base are presented as follows:

$$\begin{aligned} \mathbf{F}_N + f_{N-1,N} &= m_N \dot{\mathbf{v}}_N \\ \boldsymbol{\tau}_N + (-\mathbf{a}_N) \times f_{N-1,N} + \mathbf{b}_N \times \mathbf{F}_N &= \dot{\mathbf{H}}_N \\ f_{i-1,i} + f_{i+1,i} &= m_i \dot{\mathbf{v}}_i \end{aligned}$$

To develop controllers capable of tracking desired trajectories within the task space, it is essential to reformulate the dynamic equations of the space robot in terms of the task space control variables [415]. This transformation ensures that the control inputs are directly aligned with the task space objectives, facilitating precise trajectory tracking. Based on the above equation, the second-order derivative of the task space variable:

$$\mathbf{n}_k(\tilde{\boldsymbol{\xi}}_k) = \begin{bmatrix} \frac{\partial \Gamma_k(\tilde{\boldsymbol{\xi}}_k)}{\partial (\boldsymbol{\xi}_1)} & \frac{\partial \Gamma_k(\tilde{\boldsymbol{\xi}}_k)}{\partial (\boldsymbol{\xi}_2)} & \frac{\partial \Gamma_k(\tilde{\boldsymbol{\xi}}_k)}{\partial (\boldsymbol{\xi}_3)} \end{bmatrix}^T$$

the combined modulation matrix as

$$\begin{cases} \mathbf{S}(t) = \int_0^t e^{-\delta(t-r)} \mathbf{Y}^T \mathbf{Y} dr \\ \mathbf{W}(t) = \int_0^t e^{-\delta(t-r)} \mathbf{Y}^T \boldsymbol{\tau} dr \\ \mathbf{T}(t) = \left[ e^{-t} \mathbf{U}_0 + \int_0^t e^{t-r} \mathbf{I} \mathbf{L}^T \mathbf{L} dr \right]^{-2} = [e^t \mathbf{U}_0 + \mathbf{O}(t)]^{-2} \end{cases}$$

To further smooth the motion of obstacle avoidance, a smoothing factor  $h$  is presented in [401] to smoothly apply the homogenous solution as

$$\frac{\partial \rho_a U_a}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho_a U_{a_i} U_{a_j}) = -\frac{\partial \rho_a}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\tau - \rho_a U_{a_i} U_{a_j}) + S_{MOM}$$

Then we incorporate the Deep Learning algorithm based on the dynamics of the space robotics system. The proposed GG-CNN framework offers two significant



advantages over conventional state-of-the-art grasp synthesis convolutional neural networks (CNNs). First, instead of relying on sampling discrete grasp candidates, it generates grasp poses at a granular, pixel-by-pixel resolution [416]. This approach parallels advancements in object detection, where fully convolutional architectures are utilized to achieve pixel-wise semantic segmentation, superseding traditional methods like sliding windows or bounding boxes [417]. Such precision is particularly advantageous in space environments, where fine manipulation and accurate grasping are critical for handling delicate payloads and performing intricate tasks [418]. Second, the GG-CNN architecture is highly efficient, possessing significantly fewer parameters than its counterparts, which facilitates rapid closed-loop grasping operations. This efficiency is essential for resource-constrained environments, such as space missions, where computational power is often limited. Impressively, the grasp detection pipeline achieves execution times as low as 19 milliseconds on a GPU-enabled desktop system, enabling real-time performance in scenarios demanding high precision and adaptability. Incorporating deep learning methodologies into this framework further enhances its predictive and adaptive capabilities, making it ideal for dynamic and unpredictable extraterrestrial operations. The network equation can be expressed by

$$R_{\theta}(I) = (Q_{\theta}; \varphi_{\theta}; B_{\theta}).$$

where the grasp map  $G$  estimates the parameters of a set of grasps, for each Cartesian point in the 3D space corresponding to each pixel in the captured image. It constitutes asset of 3 images denoted as,  $Q$ ,  $\varphi$ , and  $W$ .

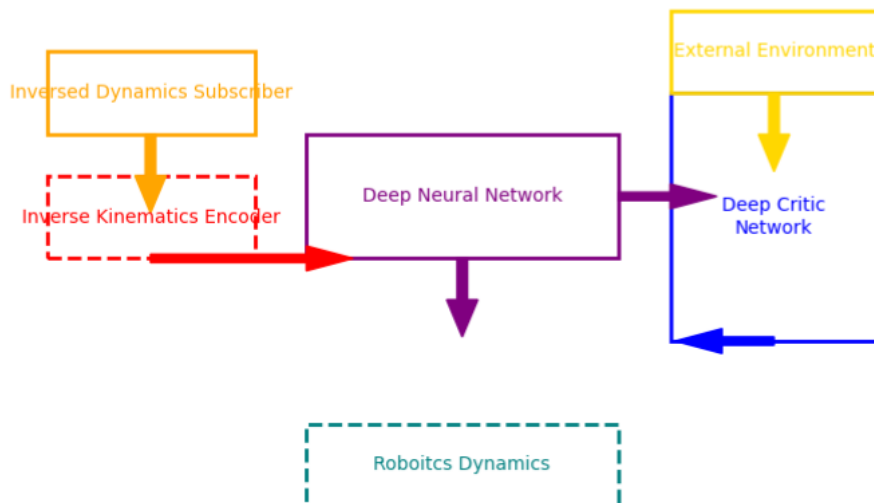


Figure 2. Algorithm design with Deep Neural Network for space module.

### 9.4.4 Results

Preliminary results indicate that our proposed framework significantly enhances the multi-drone system's ability to identify and manipulate unknown payloads. Notably, the cooperative learning paradigm improves overall performance compared to singular drone operations. The trajectory tracking for our multi-drone system in 3D space is shown in Fig.4. The tracking error compared with the other two popular machine learning methods is shown in Fig.5.

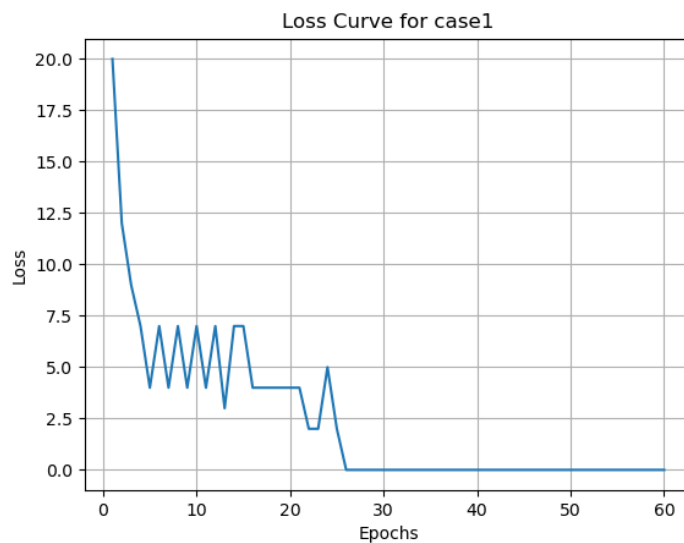


Figure 4. Loss value during the training process with our Deep Neural Network.

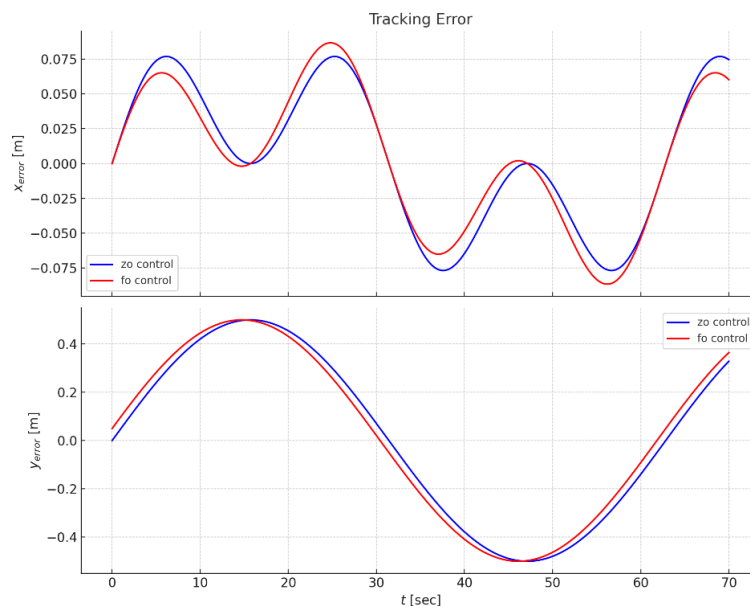


Figure 4. Trajectory tracking results for the end-effector of the robot arm on the space module in zero-gravity environment.

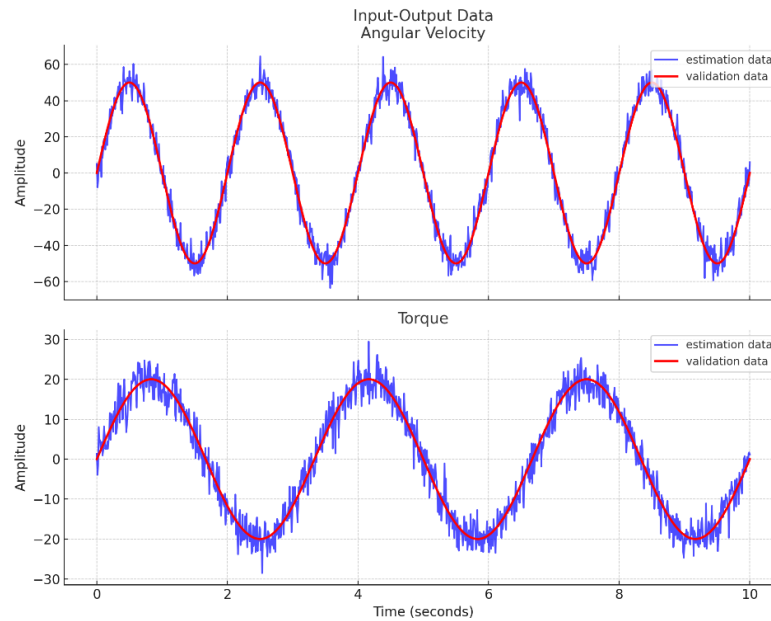


Figure 5. Amplitude of the base of the space module during the manipulation task in zero-gravity environment.

#### 9.4.5 Conclusion

This paper introduced a novel real-time whole-body obstacle avoidance framework tailored for multi-DoF redundant manipulators, with a particular focus on addressing challenges in dynamic environments. The proposed approach leverages a deformable dynamical system, where the original DS is adaptively modified through a combined modulation matrix accounting for the motion of surrounding obstacles. This deformation ensures that the end-effector can compute a trajectory capable of dynamically circumventing obstacles while achieving the desired target in real time. During trajectory tracking, null-space velocity control was employed to guarantee obstacle avoidance for the remaining non-end-effector components of the manipulator. By integrating deep learning into the framework, the system can further enhance adaptability, leveraging neural networks for real-time prediction of obstacle dynamics and optimizing control strategies in complex, high-dimensional spaces. The generalizability of the proposed approach allows its extension to manipulators with different degrees of freedom, making it particularly well-suited for applications in space environments, where precision, adaptability, and computational efficiency are paramount.

## 9.5 Analysis of material features for rendering tasks

At the current stage of the development of three-dimensional graphics, a significant attention is paid to the formation of highly realistic images. At the same time, the color intensity [419, 420] and the memory address for the memorization are calculated for each point of the image.

During the determination of color intensity  $I$  of a pixel [421], the ambient, diffuse and specular color components are taken into account

$$I = k_a I_a + k_d I_{so} (\vec{L} \cdot \vec{N}) + k_s I_{so} \cdot f_r,$$

where  $k_a$  - ambient lighting coefficient,  $I_a$  - ambient light intensity,  $k_d$  - diffuse reflection coefficient,  $I_{so}$  - light source intensity,  $\vec{L}, \vec{N}$  - illumination and normal vector respectively,  $k_s$  - specular reflection coefficient,  $f_r$  - bidirectional reflectance distribution function (BRDF) value.

Ambient color component [421] corresponds to the light reflected from the external environment objects. The diffuse component of color [421] represents the light reflected from the surface in different directions and determines the visibility of the object. The specular component of color [421] determines the reproduction of specular glares on the surface of the object.

It is important to note that  $k_d + k_s = 1$  [422]. The ratio of  $k_d$  and  $k_s$  is different for each material. When forming three-dimensional images, it is important to know these values. For example, ideal metals that are current conductors are characterized by the presence of only specular reflection of light [423]. Ideal diffuse surfaces reflect light uniformly in all directions and do not contain specular reflections. Most materials combine features of both types of light reflection.

A high  $k_s$  value [424] is typical for polished metals (0.8-1), metals (0.6-0.7), liquids (0.7-1), shiny paints (0.6-0.7), processed gemstones (0.8-0.9). A high value  $k_d$  [424] is typical for fabrics (0.6-0.8), matte plastics (0.7 – 0.8), matte paints and glass (0.8),

unpolished cellulosic materials (0.6 – 0.7). Building materials, skin, ordinary plastics have approximately equal values of  $k_d$  and  $k_s$ .

During the formation of three-dimensional images, the following formula is used for the specular component of color [421]

$$k_s \cdot I_{so} \cdot f_r.$$

BRDF ( $f_r$ ) [421, 425-430] is a function that determines the ratio of the light reflected from the light source to the observer. The two main types of BRDF are empirical and physically-based BRDFs. Empirical BRDFs usually depend on the illumination vector  $\vec{L}$ , the vector to the observer  $\vec{V}$ , and the shininess coefficient of the surface  $n$ .

$n$  [421] determines the degree of concentration of specular reflection on the surface and varies from 1 to 1000. For shiny surfaces [422]  $n$  approaches 1000. Such materials include polished metals (100-1000), metals (50-600), liquids (100- 1000), processed gemstones (100-600), glossy and semi-gloss paints (50-300). For rough and matte surfaces,  $n$  takes values, close to zero. Materials with a low  $n$  value are fabrics (5-50), plastics (5-80), skin (5-50), building materials (5-20), ceramics (5-80), unpolished cellulosic materials (5-30).

More complex physically accurate BRDFs [421, 431, 432] take into account the microfacet structure of the material surface. As a rule, the distribution function of microfacets includes the calculation of the surface roughness parameter  $\alpha$ .  $\alpha=0$  means that the surface is smooth and does not contain microfacets. A small value of  $\alpha$  [433] is characterized by the predominant orientation of the microfacet normals in the direction of light reflection. At large values of the parameter  $\alpha$  [433], the light reflection becomes more and more uniformly distributed over the entire surface, if  $\alpha=1$ , the reflection is completely uniform.

Polished metals (0.01-0.03), metals (0.1-0.4), still liquids (0.01-0.3), processed gemstones (0.02-0.25), clean glass (0.01-0.05), polished wood (0.02- 0.05), shiny paints (0.05-0.3) have a small roughness [424]. Average roughness is typical for plastics (0.05-0.5), ceramic surfaces (0.2-0.4), skin (0.2-0.7), matte paints (0.1-0.7).

The surfaces of fabrics (0.25-0.8), building materials (0.3-1), cellulose materials (0.3-0.8) are rough [424].

Table 1 [422, 424] shows typical values of surface shininess coefficient  $n$ , surface roughness  $\alpha$ , diffuse reflection coefficient  $k_d$ , specular reflection coefficient  $k_s$  for ideal mirror and ideal diffuse surfaces. An ideal mirror surface is characterized by maximum values of  $n$ ,  $k_s$ , and minimum values of  $\alpha$ ,  $k_d$ . . At the same time, an ideal diffuse surface is characterized by maximum values of  $\alpha$ ,  $k_d$ , and minimum values of  $n$ ,  $k_s$ .

**Table 1.**

The values of surface shininess coefficient, roughness, diffuse and specular reflection coefficients for ideal surfaces

Material	$n$	$\alpha$	$k_d$	$k_s$
Ideal specular surface	1000	0	0	1
Ideal diffuse surface	0	1	1	0

Table 2 [422, 424] shows the values of  $n$ ,  $\alpha$ ,  $k_d$ ,  $k_s$  for polished metals. Silver, gold, iridium, bronze, platinum, chrome are characterized by the biggest  $n$  value. A typical range of  $\alpha$  values for polished metals is 0.01 - 0.03.

**Table 2.**

The values of surface shininess coefficient, roughness, diffuse and specular reflection coefficients for polished metals

Material	$n$	$\alpha$	$k_d$	$k_s$
Polished silver	700	0.01 - 0.03	0.03	0.97
Polished iridium	700-1000	0.01 - 0.03	0.08	0.92
Polished gold	650	0.01 - 0.03	0.05	0.95
Polished bronze	600	0.01 - 0.03	0.16	0.84
Polished platinum	600-900	0.01 - 0.03	0.09	0.91

**Continuation of Table 2.**

Material	$n$	$\alpha$	$k_d$	$k_s$
Polished chrome	600-800	0.01 - 0.03	0.1	0.9
Polished copper	400	0.01 - 0.03	0.15	0.85
Polished cobalt	400-700	0.01 - 0.03	0.16	0.84
Polished nickel	300-700	0.01 - 0.03	0.14	0.86
Polished titanium	300-600	0.01 - 0.03	0.17	0.83
Polished stainless steel	200-500	0.01 - 0.03	0.18	0.82
Polished brass	200-400	0.01 - 0.03	0.19	0.81
Polished zinc	100-300	0.01 - 0.03	0.23	0.77
Polished tin	50-200	0.01 - 0.03	0.24	0.76
Polished aluminum	70-150	0.01 - 0.03	0.1	0.9
Polished magnesium	50-150	0.01 - 0.03	0.21	0.79

Table 3 [422, 424] shows the values of  $n$ ,  $\alpha$ ,  $k_d$ ,  $k_s$  for unpolished metals. Slightly smaller values of  $n$  (up to 600),  $k_s$  (about 0.7) and larger values of  $\alpha$  (0.1 – 0.4) are typical for unpolished metals.

**Table 3.**

Values of shininess coefficient, surface roughness, diffuse and specular reflection coefficients for metals

Material	$n$	$\alpha$	$k_d$	$k_s$
Chrome	600	0.1 - 0.2	0.29	0.71
Silver	400	0.1 - 0.25	0.3	0.7
Gold	400	0.1 - 0.3	0.3	0.7
Iridium	300-600	0.1 - 0.3	0.31	0.69
Brass	218	0.1 - 0.3	0.39	0.61
Bronze	200	0.1 - 0.3	0.39	0.61
Platinum	200-400	0.1 - 0.3	0.33	0.67

**Continuation of Table 3.**

Material	$n$	$\alpha$	$k_d$	$k_s$
Titanium	100-300	0.1 - 0.3	0.39	0.61
Nickel	100-300	0.1 - 0.3	0.36	0.64
Copper	100	0.1 - 0.3	0.4	0.6
Cobalt	100-300	0.1 - 0.35	0.36	0.64
Tin	77	0.1 - 0.35	0.41	0.59
Stainless steel	50-200	0.1 - 0.35	0.42	0.58
Zinc	50-150	0.1 - 0.35	0.43	0.57
Magnesium	20-50	0.1 - 0.4	0.45	0.55
Aluminum	10-50	0.1 - 0.4	0.45	0.55

Table 4 [422, 424] shows the values of  $n$ ,  $\alpha$ ,  $k_d$ ,  $k_s$  for plastics and elastomers. The most shiny are transparent plastic (acrylic), polycarbonate, glossy plastic ( $n$  is 10 - 80,  $k_s$  has a value of 0.6 - 0.7). Polypropylene, matte plastic, rubber have small values of  $n$  (1 - 20),  $k_s$  (0.2). The roughness of these materials is average (values around 0.4-0.5).

**Table 4.**

Values of shininess coefficient, surface roughness, diffuse and specular reflection coefficients for plastics and elastomers

Material	$n$	$\alpha$	$k_d$	$k_s$
Transparent plastic (acrylic)	30-80	0.05 - 0.15	0.37	0.63
Polycarbonate	20-50	0.05 - 0.15	0.38	0.62
Glossy plastic	10-50	0.05 - 0.2	0.33	0.67
PET (polyethylene terephthalate)	10-40	0.05 - 0.2	0.39	0.61
ABS plastic	10-40	0.1 - 0.3	0.52	0.48
PVC (polyvinyl chloride)	10-30	0.1 - 0.3	0.52	0.48



**Continuation of Table 4.**

Material	$n$	$\alpha$	$k_d$	$k_s$
Plastic film	10-30	0.05 - 0.2	0.7	0.3
Polystyrene	5-25	0.1 - 0.4	0.55	0.45
Polypropylene	5-20	0.1 - 0.4	0.8	0.2
Epoxy resin	5-20	0.1 - 0.4	0.52	0.48
Matte plastic	1-10	0.2-0.5	0.78	0.22
Rubber	5-20	0.5-0.7	0.81	0.19

Table 5 [422, 424] shows the values of  $n$ ,  $\alpha$ ,  $k_d$ ,  $k_s$  for fabrics. A characteristic feature of fabrics is high values of  $\alpha$  and  $k_d$ . Accordingly,  $n$  is insignificant. In particular, microfiber, fleece, and felt have the highest roughness (0.4–0.8). Their  $k_d$  and  $n$  values are 0.8 and 1–10, respectively. Velvet, silk, satin are more shiny materials and have a value of  $n$  10-50.

**Table 5.**

Values of shininess coefficient, surface roughness, diffuse and specular reflection coefficients for fabrics

Material	$n$	$\alpha$	$k_d$	$k_s$
Velvet	20-50	0.4 - 0.8	0.82	0.18
Latex	20-50	0.25 - 0.5	0.75	0.25
Silk	10-30	0.25 - 0.6	0.7	0.3
Sateen	10-30	0.2 - 0.6	0.66	0.34
Atlas	10-30	0.2 - 0.6	0.63	0.37
Velor	10-30	0.4 - 0.6	0.71	0.29
Chiffon	10-30	0.3 - 0.5	0.7	0.3
Jacquard	10-30	0.25 - 0.5	0.67	0.33
Jeans	5-20	0.3 - 0.7	0.77	0.23
Knitwear	5-20	0.3 - 0.7	0.77	0.23

**Continuation of Table 5.**

Material	$n$	$\alpha$	$k_d$	$k_s$
Cotton	5-20	0.3 - 0.8	0.8	0.2
Flax	1-10	0.3 - 0.8	0.79	0.21
Wool	1-10	0.3 - 0.8	0.79	0.21
Polyester	1-10	0.3 - 0.8	0.76	0.24
Nylon	1-10	0.3 - 0.6	0.74	0.26
Fleece	1-10	0.4 - 0.8	0.81	0.19
Microfiber	1-10	0.4 - 0.8	0.76	0.24
Felt	1-10	0.4 - 0.8	0.82	0.18

Table 6 [422, 424] shows the values of  $n$ ,  $\alpha$ ,  $k_d$ ,  $k_s$  for different types of skin.

The skin is characterized by a relatively low shininess ( $n$  is 5-50, the highest value is for wet, oily skin and skin with makeup) and moderate roughness (0.2-0.7, the roughest is skin with problems and dry skin).

The values of the coefficients  $k_d$ ,  $k_s$  are approximately similar with a predominance of  $k_d$  (0.55 - 0.7).

**Table 6.**

Values of shininess coefficient, surface roughness, diffuse and specular reflection coefficients for different types of skin

Material	$n$	$\alpha$	$k_d$	$k_s$
Moist skin	20-50	0.2 - 0.4	0.67	0.33
Oily skin	20-40	0.2 - 0.3	0.61	0.39
Skin with makeup	10-30	0.1 - 0.3	0.55	0.45
Normal skin	10-25	0.3 - 0.6	0.68	0.32
Skin with problems (acne, scars)	5-15	0.5 - 0.7	0.72	0.28
Dry skin	5-15	0.4 - 0.7	0.72	0.28

Table 7 [422, 424] shows the values of  $n$ ,  $\alpha$ ,  $k_d$ ,  $k_s$  for liquids. Clean and still liquids have high value of  $n$ ,  $k_s$  and insignificant roughness  $\alpha$ . For example, for clean still water  $n=1000$ ,  $k_s = 0.96$ ,  $\alpha = 0.01-0.05$ . At the same time, opaque and mobile liquids are rougher and less shiny. For example, for water with waves  $n=200-500$ ,  $k_s = 0.84$ ,  $\alpha = 0.05-0.3$ . For muddy water, the values are as follows:  $n=100-200$ ,  $k_s = 0.68$ ,  $\alpha = 0.1-0.3$ .

**Table 7.**

Values of shininess coefficient, surface roughness, diffuse and specular reflection coefficients for liquids

Material	$n$	$\alpha$	$k_d$	$k_s$
Clean still water	1000	0.01 - 0.05	0.04	0.96
Nail polish	500-1000	0.1 - 0.25	0.27	0.73
Oil (vegetable, motor)	500-800	0.05 - 0.1	0.26	0.74
Alcohol (ethanol)	300-600	0.01 - 0.05	0.1	0.9
Ice	300-500	0.05 - 0.15	0.13	0.87
Water with waves	200-500	0.05 - 0.3	0.16	0.84
Juice (clear)	200-400	0.05 - 0.1	0.17	0.83
Sweet drinks (carbonated)	200-400	0.05 - 0.1	0.17	0.83
Blood	100-300	0.05 - 0.3	0.24	0.76
Honey	100-300	0.1 - 0.3	0.24	0.76
Soap or shampoo solutions	100-300	0.1 - 0.3	0.23	0.77
Juice (opaque)	100-300	0.1 - 0.3	0.29	0.71
Ink	100-300	0.1 - 0.3	0.3	0.7
Muddy water	100-200	0.1 - 0.3	0.32	0.68
Milk	50-150	0.1 - 0.3	0.33	0.67
Coffee	50-150	0.1 - 0.3	0.33	0.67
Tea	50-150	0.1 - 0.3	0.33	0.67

Table 8 [422, 424] shows the values of  $n$ ,  $\alpha$ ,  $k_d$ ,  $k_s$  for various paints and varnishes. Materials such as glossy paint, clear varnish, automotive and enamel paints have a fairly high value of  $n$  (80-300) and  $k_s$  (0.7-0.8) and a small value of  $\alpha$  (0.05-0.3). Paints of a different type, such as matte, water-based, wall paint, are characterized by lower values of  $n$  (10-70), a significant proportion of diffuse light reflection  $k_d$  (0.5-0.8), high roughness (0.3-0.7).

**Table 8.**

Values of shininess coefficient, surface roughness, diffuse and specular reflection coefficients for paints and varnishes

Material	$n$	$\alpha$	$k_d$	$k_s$
Varnish (transparent)	100-300	0.05 - 0.15	0.22	0.78
Glossy paint	100-200	0.05 - 0.15	0.26	0.74
Automotive paint	100-200	0.05 - 0.3	0.3	0.7
Enamel paint	80-200	0.05 - 0.15	0.27	0.73
Semi-gloss paint	50-150	0.1 - 0.3	0.43	0.57
Paint for metal	50-150	0.1 - 0.3	0.38	0.62
Oil paint	50-150	0.1 - 0.4	0.39	0.61
Paint for wood	30-100	0.1 - 0.4	0.4	0.6
Paint for plastic	20-80	0.1 - 0.3	0.39	0.61
Wall paint (exterior)	20-70	0.3 - 0.6	0.47	0.53
Acrylic paint	20-70	0.1 - 0.3	0.42	0.58
Latex paint	20-50	0.2 - 0.5	0.44	0.56
Matte paint	10-50	0.3 - 0.7	0.76	0.24
Wall paint (interior)	10-50	0.3 - 0.5	0.49	0.51
Water-based paint	10-40	0.3 - 0.5	0.48	0.52

Table 9 [422, 424] shows the values of  $n$ ,  $\alpha$ ,  $k_d$ ,  $k_s$  for stones. The high smoothness of the surface is characteristic of processed gemstones. Therefore, the

value of  $\alpha$  is minimal (0.02 – 0.05 for ruby and emerald), and the shininess is high ( $n$  is 600 for ruby and emerald). Accordingly,  $k_s$  is also significant (about 0.85). Common stones, such as unpolished marble and granite, are less shiny ( $n = 20 - 60$ ) and rougher ( $\alpha = 0.1 - 0.25$ ).

**Table 9.**

Values of shininess coefficient, surface roughness, diffuse and specular reflection coefficients for stones

Material	$n$	$\alpha$	$k_d$	$k_s$
Emerald (processed)	600	0.02 - 0.05	0.14	0.86
Ruby (processed)	600	0.02 - 0.05	0.14	0.86
Obsidian (worked)	300	0.02 - 0.05	0.19	0.81
Turquoise (processed)	100	0.05 - 0.15	0.22	0.78
Jade (processed)	100	0.05 - 0.15	0.22	0.78
Polished marble	50-200	0.02 - 0.1	0.19	0.81
Polished granite	50-200	0.02 - 0.1	0.19	0.81
Marble	30-60	0.1 - 0.25	0.32	0.68
Granite	20-50	0.1 - 0.25	0.32	0.68

Table 10 [422, 424] shows the values of  $n$ ,  $\alpha$ ,  $k_d$ ,  $k_s$  for building materials. The surfaces of most building materials are non-glossy, have average (0.3 – 0.7 for concrete and brick) or high roughness (0.5 – 1.0 for asphalt and sand) and approximately the same values of  $k_d$ ,  $k_s$ .

**Table 10.**

Values of shininess coefficient, surface roughness, diffuse and specular reflection coefficients for building materials

Material	$n$	$\alpha$	$k_d$	$k_s$
Asphalt	5-20	0.5 – 1	0.51	0.49
Brick	5-15	0.3 - 0.7	0.51	0.49
Concrete	5-15	0.3 - 0.5	0.5	0.5
Sand	2-10	0.7-0.9	0.63	0.37

Table 11 [422, 424] shows the values of  $n$ ,  $\alpha$ ,  $k_d$ ,  $k_s$  for cellulosic materials. Unpolished wood has a non-smooth surface and, accordingly, high roughness  $\alpha$  (0.7 for oak, cherry). The surface of unpolished wood is characterized mainly by diffuse light reflection ( $k_d$  is about 0.7 for oak, cherry, pine) and a low value of  $n$  (up to 30). Polished wood is slightly more shiny ( $n=50-100$  for maple) and have a slight roughness ( $\alpha=0.02 - 0.05$ ). Paper and cardboard are rough ( $\alpha=0.6-0.8$ ) and diffuse ( $k_d=0.7$ ) materials.

**Table 11.**

Values of shininess coefficient, surface roughness, diffuse and specular reflection coefficients for cellulosic materials

Material	$n$	$\alpha$	$k_d$	$k_s$
Polished maple	50-100	0.02 - 0.05	0.37	0.63
Polished mahogany	40-80	0.02 - 0.05	0.37	0.63
Polished teak wood	30-70	0.02 - 0.05	0.37	0.63
Polished cherry	30-70	0.02 - 0.05	0.37	0.63
Polished oak	30-60	0.02 - 0.05	0.37	0.63
Polished pine	10-40	0.02 - 0.05	0.38	0.62
Maple	10-30	0.3 - 0.6	0.64	0.36
Mahogany	10-30	0.25 - 0.5	0.63	0.37

**Continuation of Table 11.**

Material	$n$	$\alpha$	$k_d$	$k_s$
Teak tree	10-30	0.4 - 0.6	0.63	0.37
Cherry	10-30	0.3 - 0.7	0.65	0.35
Oak	10-30	0.2 - 0.7	0.64	0.36
Pine	5-20	0.3 - 0.6	0.65	0.35
Paper	5-20	0.6 - 0.8	0.67	0.33
Cardboard	5-15	0.6 - 0.8	0.72	0.28

Table 12 [422, 424] shows the values of  $n$ ,  $\alpha$ ,  $k_d$ ,  $k_s$  for ceramics and glass. The  $n$  value for ceramics is relatively small (from 5-20 for earthenware to 30-80 for glazed ceramics). The roughness  $\alpha$  of ceramic products is average (0.2-0.4). The coefficient of diffuse  $k_d$  reflection is average (0.5-0.6 for glazed ceramics, porcelain) or high (0.8 for earthenware). Pure glass is smooth ( $\alpha = 0.02 - 0.05$ ) and highly shiny ( $n = 600 - 1000$ ,  $k_s = 0.98$ ). At the same time, frosted glass has an average roughness ( $\alpha = 0.3 - 0.6$ ), a large  $k_d$  value (0.8) and a relatively small  $n$  value (30-100).

**Table 12.**

Values of shininess coefficient, surface roughness, diffuse and specular reflection coefficients for ceramics and glass

Material	$n$	$\alpha$	$k_d$	$k_s$
Glazed ceramics	30-80	0.2 - 0.3	0.5	0.5
Porcelain	10-40	0.2 - 0.3	0.6	0.4
Earthenware	5-20	0.2 - 0.4	0.8	0.2
Clean glass	600-1000	0.01-0.05	0.02	0.98
Frosted glass	30-100	0.3-0.6	0.8	0.2

The data in Tables 1-12 are approximate and intended to be used as initial shader parameter values. In the future, these parameters can be more accurately selected depending on the features of the three-dimensional scene.

In general, determining the characteristics of light reflection for each material allows to adaptively choose the appropriate lighting model, taking into account the requirements for performance and realism of scene formation.

Therefore, such parameters as the diffuse reflection coefficient, specular reflection coefficient, surface roughness, surface shininess are taken into account for the color intensity of a pixel calculation. The correctness of the presentation of the optical properties of the surface of the object during rendering depends significantly on the selection of these coefficients. Shiny and smooth materials, such as metals, still liquids, gemstones, are characterized by a large value of the specular reflection coefficient and surface specularity coefficient. Rough and matte materials, such as wood, fabrics, plastics, have large values of the coefficient of diffuse reflection and surface roughness.



## **9.6 Науково-методичний апарат інтелектуальної оцінки стану складних систем**

Метаевристичні алгоритми широко застосовуються для оптимізації у різних завданнях, зокрема з метою відбору інформативних підмножин ознак при побудові моделі машинного навчання [434-448].

Видалення зайвих ознак допомагає уникнути перенавчання моделі та зменшити її складність. При використанні метаевристики, як інструменту відбору ознак необхідною умовою є здатність алгоритму здійснювати пошуку бінарному просторі [446-470]. Однак у той час, як деякі метаевристики, наприклад генетичний алгоритм, спочатку були створені для роботи з бінарними вхідними векторами, інші були розроблені для роботи в безперервній області пошуку. Очевидно, що тільки генетичний алгоритм не здатний бути універсальним інструментом для будь-яких даних, оскільки це суперечить теоремі про безкоштовні сніданки [471-483].

Найбільш відомим представником евристичних методів є ройовий інтелект, що описує колективну поведінку децентралізованої системи, що самоорганізується [484-508].

Існує велика кількість ройових алгоритмів, наприклад: метод рою частинок, мурашиний алгоритм, алгоритм зозулі, кажанів, риб, бджіл, колонізаційні алгоритми та ін. [440-446].

Використання ройових алгоритмів для пошуку рішень щодо стану об'єктів аналізу дозволяє здійснити:

- аналіз стійкості стану неоднорідних об'єктів в процесі бойового застосування (експлуатації);
- аналіз безпосереднього, агрегованого та опосередкованого взаємовпливу системних та зовнішніх факторів;
- оцінку досяжності цільових ситуацій управління об'єктами;
- сценарний аналіз при різних деструктивних впливах;

- прогноз зміни стану неоднорідних об'єктів при впливі дестабілізуючих факторів в ході бойового застосування (експлуатації);
- моделювання та аналіз динаміки зміни стану взаємозалежних параметрів неоднорідних об'єктів.

Разом з тим, використання наведених вище метаевристичних алгоритмів в канонічному вигляді не дозволяє отримати оперативну оцінку стану об'єкту з заданою достовірністю. Зазначене обумовлює пошук нових (удосконалення існуючих) підходів до оцінки та прогнозування стану об'єктів шляхом поєднання вже відомих ройових алгоритмів з їх подальшим удосконаленням.

### **9.6.1 Метод оцінки стану складних технічних систем з використанням біоінспірованих алгоритмів**

Метод оцінки стану складних технічних систем з використанням біоінспірованих алгоритмів складається з такої послідовності дій.

*Дія 1. Введення вихідних даних.* На даному етапі вводяться вихідні дані, що наявні про об'єкт, що підлягає аналізу. Також відбувається ініціалізація наявної моделі об'єкту аналізу. Задається набір аналізованих функцій стану об'єкту з реалізацією відповідних процедур (у даному випадку реалізовано дві функції:

$$F(x) = \sin(x), \text{ та } F(x) = -(x^2 + 12x - 21).$$

*Дія 2. Оброблення вихідних даних з урахуванням ступеню невизначеності.*

На даному етапі відбувається врахування типу невизначеності про об'єкт, що підлягає аналізу та проводиться ініціалізація базової моделі стану об'єкту, що підлягає аналізу [435, 452, 454]. При цьому ступінь невизначеності може бути: повна інформованість; часткова невизначеність та повна невизначеність. Зазначене здійснюється за допомогою корегувальних коефіцієнтів.

Перелік змінних, що використовуються, з їх позначеннями всередині алгоритму та описом призначень, представлений у табл. 1.

*Дія 3. Нумерація агентів-кажанів,  $i, i \in [0, S]$ .*

Дія 4. Розставлення агентів кажанів (АК) з урахування ступеню невизначеності про стан об'єкту аналізу у просторі пошуку:

$$x \in (x_{\min}, x_{\max}), \quad x_i = (x_1, x_2 \dots x_S), \quad (1)$$

$$x = x_{\min} + (x_{\max} - x_{\min}) * l(). \quad (2)$$

де  $x_{\min}, x_{\max}$  – мінімальне та максимальне значення ділянки пошуку,  $l()$  – ступінь невизначеності про стан об'єкту аналізу. При цьому функція  $l()$  повертає значення в інтервалі  $[0; 1]$

Дія 5. Задання початкової швидкості АК та частоти ехолокації кожного АК.

Початкова швидкість  $v_0$  кожного АК визначається наступним виразом:

$$v_i = (v_1, v_2 \dots v_S), \quad v_i = v_0. \quad (3)$$

Початкова частота АК визначається виразом:

$$w_i = (w_1, w_2 \dots w_S), \quad w_i = w_{\min}. \quad (4)$$

$w_i$  – значення частоти АК з номером  $i$ ,  $w_{\min}$  – мінімальна частота АК.

Якщо  $i < S$ , то повертаємось на дію 4.

Дія 6. Знаходження найкращого АК.

Підстановка найкращого значення АК  $x_i$  у вираз аналізованої функції  $F(X)$ .

Найближче до екстремуму значення АК (у даному випадку до максимуму) вважається кращим,  $x_k^* = \max(F(x))$ , де  $k$  – це номер кращого АК. Для знаходження кращого АК використовується удосконалений генетичний алгоритм розроблений в роботі [455].

Дія 7. Міграція АК. Виконується міграція агентів: агенти переміщуються на один крок відповідно до міграційної процедури та здійснюється виконання ітерацій з  $n$ , де  $n, \in [0, N]$ .

Дія 8. Повторна нумерація АК  $i, I \in [0, S]$ .

Дія 9. Зміна параметрів пошуку.

Обчислюються нові значення положення, швидкості та частоти для АК –  $x'_i, v'_i$  та  $w'_i$ . Модифікується частота з урахуванням ступеню зашумленості даних по наступному виразу:

$$w_i^l = w_{\min} + (w_{\max} - w_{\min}) * \eta(). \quad (5)$$

Дія 10. Зміна швидкості руху АК.

Виконується модифікація швидкості:

$$v_i^l = v_i + w_i (x^* - x_i), \quad (6)$$

де  $(x^* - x_i)$  – наближення всіх АК на  $\eta \rightarrow \max$ .

Дія 11. Переміщення АК.

Виконується переміщення АК у відповідності з формулою:  $x_i^l = x_i + v_i$ .

Перевірка умови  $i < S$ , якщо  $i < S$ , то здійснюється перехід на дію 10.

Дія 12. Перевірка умови запуску процедури локального пошуку.

Якщо  $E_r > \eta()$ , то запускається процедура локального пошуку (перехід на дію 16), інакше виконується перехід на дію 19. Процедура пошуку навколо кращого рішення проводиться з ймовірністю  $E_r$ . Отримане рішення застосовується як нове поточне положення АК  $x_i$ .

Дія 13. Перевірка кількості ітерацій пошуку рішення  $n$ . Якщо пошук виконується не вперше, то виконується перехід на дію 19. Інакше: обчислюється гучність АК за формулою:

$$a_i = (a_1, a_2 \dots a_s); a_i^l = a_{\min} + (a_{\max} - a_{\min}) * \eta(), \quad (7)$$

де  $a_i^l$  – це нове значення гучності та виконується перехід на дію 18.

Дія 14. Середня гучність АК обчислюється за допомогою наступного виразу:

$$a_{sr} = (\sum_{i=0}^s a) / S. \quad (8)$$

Дія 15. Зміна поточної позиції АК:

$$xx_i^l = x_i + a_{sr} * U[-1, 1]. \quad (9)$$

Функція  $U[-1, 1]$  повертає випадкове значення до інтервалу  $[-1; 1]$ .

Дія 16. Процедура локального пошуку виконується до того часу, поки АК не стане ближче до мети пошуку:  $F(xx_i) > F(x_i)$ .

Дія 17. Обмеження ділянки пошуку:

$$xx_i = \max \{x_{\min}, x_i\}, \quad xx_i = \min \{x_{\max}, x_i\}. \quad (10)$$

*Дія 18. Глобальний пошук рішення.*

З ймовірністю  $E_a$  проводиться процедура глобального пошуку в околиці поточного рішення для всіх  $i$ -х АК,  $i, i \in [0, S]$ .

*Дія 19. Якщо  $F(xx_i) < F(x_i)$  та  $E_a > \eta()$ , то приймається нове рішення:  $x_i = xx_i$ .*

Якщо  $i < S$ , то виконується перехід на дію 20. Виконується обмеження області пошуку для всіх  $i$ -х АК,  $i, i \in [0, S]$ .

*Дія 20. Перевірка виконання сукупності умов:*

якщо  $x_i < x_{\min}$ , ТОДІ:  $x_i = x_{\min}$ ,  $v_i = v_0$ .

якщо  $x_i > x_{\max}$ , ТОДІ:  $x_i = x_{\max}$ ,  $v_i = v_0$ .

якщо  $i < S$ , то здійснюється перехід на крок 10.

якщо  $n < N$ , то виконується перехід на крок 7.

Після виконання всіх ітерацій приймається значення  $x^*$  щодо стану об'єкту аналізу.

*Дія 20. Навчання баз знань.*

В зазначеному дослідженні для навчання баз знань використовується розроблений у дослідженні [435] метод навчання на основі штучних нейронних мереж, що еволюціонують.

Кінець алгоритму.

Запропонований метод оцінки стану складних технічних систем з використанням біоінспірованих алгоритмів. Для оцінки ефективності розробленого методу виконано його порівняльну оцінку з результатами досліджень, викладених в роботах [436–439, 456, 457, 470].

Проведено моделювання роботи методу обробки пошуку рішень відповідно виразів (1)–(10). Проведено моделювання роботи запропонованого методу в програмному середовищі MathCad 14 (США). В якості задачі, що вирішувалася при проведенні моделювання була оцінка елементів оперативної обстановки угруповання військ (сил).

В табл. 1, 2 наведено залежність часу роботи алгоритму від кількості ітерацій та розміру популяції та залежність абсолютної похибки алгоритму від кількості ітерацій та розміру популяції.

Таблиця 1 – Залежність часу роботи алгоритму від кількості ітерацій та розміру популяції

№ з/п	Кількість ітерацій	Функція	Розмір популяції					
			5	10	15	20	50	100
1	10	$f(x)=\sin(x)$	2,88	3,23	3,82	3,71	2,84	3,03
		$f(x)=-x^2+12x-21$	2,85	3,12	2,98	2,99	3,01	3,00
2	20	$f(x)=\sin(x)$	5,15	5,70	6,32	6,34	5,36	7,43
		$f(x)=-x^2+12x-21$	5,26	5,22	5,12	5,19	5,37	5,09
3	50	$f(x)=\sin(x)$	11,97	12,10	12,38	12,01	12,62	13,58
		$f(x)=-x^2+12x-21$	12,27	12,08	12,22	12,30	12,36	13,50
4	100	$f(x)=\sin(x)$	24,39	42,08	31,72	37,52	118,08	214,38
		$f(x)=-x^2+12x-21$	24,37	28,25	39,53	53,35	77,33	151,18

Насамкінець слід зазначити, що представлена реалізація алгоритму кажанів показала хорошу працездатність і можливість налаштування параметрів алгоритму для зміни якості одержуваних результатів у вирішенні задач пошукової оптимізації речових функцій.

Таблиця 2 – Залежність абсолютної похибки алгоритму від кількості ітерацій та розміру популяції

№ з/п	Кількість ітерацій	Функція	Розмір популяції					
			5	10	15	20	50	100
1.	10	$f(x)=\sin(x)$	0,0239	0,0507	0,0017	0,0012	0,00026	0,00018
		$f(x)=-x^2+12x-21$	0,0006	0,1112	0,01111	0,1114	0,00005	0,0008
2.	20	$f(x)=\sin(x)$	0,0079	0,0017	0,00063	0,00083	0,00007	0,00019
		$f(x)=-x^2+12x-21$	0,0085	0,01131	0,0011	0,11131	0,00004	0,00001
3.	50	$f(x)=\sin(x)$	0,0004	0,00011	0,00058	0,00042	0,00026	0,00002
		$f(x)=-x^2+12x-21$	0,1115	0,01113	0,10111	0,00000	0	0,11111
4	100	$f(x)=\sin(x)$	0,0008	0,00006	0,000041	0,00001	0	0
		$f(x)=-x^2+12x-21$	0,0111	0	0	0,01111	0,00011	0

У табл. 3 представлені порівняльні результати оцінки оперативності навчання штучних нейронних мереж, що еволюціонують.

Таблиця 3 – Порівняльні результати оцінки оперативності навчання штучних нейронних мереж, що еволюціонують

Система	Параметри алгоритму	ХВ (Індекс Ксі-Бені)	Час, сек
FCM (Fuzzy C-Means)	–	0.2004	2.15
EFCM	Dthr=0.30	0.1018	0.155
EFCM	Dthr=0.23	0.1062	0.2
Запропонована система (пакетний режим)	delta=0.1	0.08	0.2
Запропонована система (online режим)	delta=0.1	0.078	0.19

Перед навчанням ознаки спостережень були нормалізовані на інтервалі [433, 434].

Дослідження показало, що зазначена процедура навчання забезпечує в середньому на 10–18 % більшу високу ефективність навчання штучних нейронних мереж та не накопичує помилок в ході навчання (табл. 3).

Зазначені результати видно з результатів в останніх строках табл. 3, як різниця індексу Ксі-Бені. Разом з тим, як вже було зазначено, в ході роботи відомі методи накопичують похибки, саме тому в запропонованому методі запропоновано використання штучних нейронних мереж, що еволюціонують.

Результати порівняльної оцінки по критерію оперативності оцінювання наведені в табл. 4.

Таблиця 4– Результати розв’язання задачі

№ ітерації	Метод гілок та границь [450]	Генетичний алгоритм [445]	Канонічний алгоритм кажанів [456]	Удосконалений алгоритм кажанів
<i>N</i>	<i>T</i> , с	<i>T</i> , с	<i>T</i> , с	<i>T</i> , с
5	1,125	1,125	1,125	1,114
10	0,625	0,625	0,625	0,600
15	48,97	58,20	58,28	57,71
20	106,72	44,29	43,75	46,95
30	–0,1790	–0,0018	–0,0002	–0,0001

Продовження таблиці 4

40	-0,158	-0,070	-0,069	-0,049
50	97,76	-974,30	-3,72	-334,11
100	-133,28	-195,71	-196,24	-193,04
200	<b>7980,89</b>	<b>7207,49</b>	<b>7198,43</b>	<b>7036,48</b>

Як видно з табл. 4, виграш зазначеного методу пошуку рішень складає від 11 до 15 % по критерію оперативності обробки даних.

Основними перевагами запропонованого методу є:

– має гнучку ієрархічну структуру показників, що дозволяє звести завдання багатокритеріального оцінювання альтернатив до одного критерію або використовувати для вибору вектор показників;

– однозначність отриманої оцінки стану об'єкту аналізу;

– універсальність застосування за рахунок адаптації системи показників в ході роботи;

– не накопичує похибку навчання за рахунок використання процедури навчання;

– можливість комплексного навчання архітектури та параметрів штучних нейронних мереж;

– врахування типу невизначеності вихідних даних при побудові моделей неоднорідного об'єкту аналізу;

– можливість пошуку рішення за декількома напрямками;

– висока достовірність отриманих рішень при пошуку рішення у декількох напрямках;

– відсутність попадання в пастку локального оптимуму.

Обмеженнями дослідження є необхідність наявності початкової бази даних про стан об'єкті аналізу, необхідність врахування часу затримки на збір та доведення інформації від джерел розвідувальних відомостей.

Переваги запропонованого методу обумовлені наступним:

– при виставленні АК враховується тип невизначеності (дія 2 1);

– універсальність вирішення завдання аналізу стану об'єктів АК за рахунок



ієрархічності їх опису (вирази (1)–(10));

– можливість швидкого пошуку рішень за рахунок одночасного пошуку рішення декількома особинами (дії 1–20);

– адекватністю отриманих результатів (вирази (1)–(10));

– здатність уникнення проблеми локального екстремуму (дії 1–20);

– можливістю глибокого навчання баз знань АК (дія 21).

До недоліків запропонованого методу слід віднести:

– втрата інформативності при оцінюванні стану об'єкту аналізу за рахунок побудови функції належності;

– менша точність оцінювання по окремо взятому параметру оцінки стану об'єкту аналізу;

– втрата достовірності отриманих рішень при пошуку рішення в декількох напрямках одночасно;

– менша точність оцінювання порівняно з іншими методами оцінки.

Зазначений метод дозволить:

– провести оцінку стану неоднорідного об'єкту аналізу;

– визначити ефективні заходи для підвищення ефективності управління;

– підвищити швидкість оцінки стану неоднорідного об'єкту аналізу;

– зменшити використання обчислювальних ресурсів систем підтримки прийняття рішень.

Запропонований підхід доцільно використовувати для вирішення задач оцінки складних та динамічних процесів, що характеризуються високим ступенем складності.

Зазначене дослідження є подальшим розвитком досліджень, що спрямовані на розробку методологічних засад підвищення ефективності обробки різнотипних даних, що опубліковані вже раніше [435, 437–439, 456].

Напрями подальших досліджень слід спрямувати на зменшення обчислювальних витрат при обробці різнотипних даних в системах спеціального призначення.

### **9.6.2 Розробка методу пошуку рішень з використанням популяційного алгоритму глобальної пошукової оптимізації**

Метод пошуку рішень з використанням популяційного алгоритму глобальної пошукової оптимізації складається з такої послідовності дій.

*Дія 1.* Введення вихідних даних. На даному етапі вводяться вихідні дані, що наявні про об'єкт, що підлягає аналізу.

*Дія 2.* Оброблення вихідних даних з урахуванням ступеню невизначеності.

Відбувається розставлення агентів-бур'янів з урахуванням типу невизначеності про стан об'єкту аналізу. На даному етапі відбувається врахування типу невизначеності про об'єкт, що підлягає аналізу та проводиться ініціалізація базової моделі стану об'єкту, що підлягає аналізу [435, 452, 454]. При цьому ступінь невизначеності може бути: повна інформованість; часткова невизначеність та повна невизначеність. Зазначене здійснюється за допомогою відповідних корегувальних коефіцієнтів.

Вирішальним критерієм під час проведення класифікації є відсоток неправильно класифікованих записів. Чим менше частка неправильно класифікованих записів, щодо загальної маси, тим краще працює класифікатор на даних вхідних параметрах. Крім цього на практичне застосування класифікатора сильно впливає час, необхідний навчання класифікатора і безпосередньо класифікації. У зв'язку з тим, що база значень може містити записи про об'єкт, що складаються з множини параметрів, що несе великі витрати машинного часу, виникає необхідність скоротити частину інформативних ознак. Як алгоритм класифікації використовується алгоритм інвазійних бур'янів. Скорочення розмірності простору інформативних ознак проводиться за допомогою удосконаленого генетичного алгоритму, а навчання особин, проводиться з використанням методу навчання штучних нейронних мереж, що еволюціонують.

*Дія 3.* Формування вектору оптимізації.

Вектор оптимізації представлений у вигляді масиву  $X_i$  і приймає значення від 1 до  $\sum_{j=1}^L kO_j$ , де  $L$  – кількість вхідних змінних системи,  $k$  – кількість змінних,

що описують стан системи,  $O$  – кількість станів для  $j$ -ої змінної. Задається кількість ітерацій  $N$  та максимальна кількість векторів, яка може бути збережена після кожної ітерації  $S$ . Задаються параметри  $n_{\min}$  та  $n_{\max}$ , які відповідають мінімальному та максимальному значенню нащадкових векторів, які може створити батьківський вектор на кожній ітерації. Задається параметр розподілу. Генерується початковий вектор  $X^0$ , і розраховується для нього середньоквадратична помилка та фітнес функція  $\varphi^0$  на основі помилки.

Для кожного вектору  $X^s$  ( $s$  приймає значення від 1 до поточної кількості векторів) визначається  $n^s$  – кількість векторів, що може породити даний вектор:

$$n^s = \frac{n_{\max} - n_{\min}}{\varphi^{best} - \varphi^{worst}} \varphi^s + \frac{\varphi^{best} n_{\min} - \varphi^{worst} n_{\max}}{\varphi^{best} - \varphi^{worst}}, \quad (11)$$

де  $\varphi^{best}$ ,  $\varphi^{worst}$  – найкраще та найгірше значення фітнес-функції.

*Дія 4.* Створення векторів-нащадків.

Для кожного вектору  $X$  створюється  $n^s$  нових векторів по правилам:

$$X_i^{s,j} = X_i^s + u, j = (\overline{1, n^s}),$$

$$u \square N(0, \delta_N) = \delta_N \sqrt{-2 \ln(a)} \cos(b), \delta_N = \delta \left( \frac{N - N'}{N} \right), \quad (12)$$

де  $N'$  – номер поточної ітерації,  $a$ ,  $b$  – випадкові числа [433, 434],  $X_i^s$  – компонента вектору  $X^s$ ,  $u$  – функція розподілу.

*Дія 5.* Впорядкування векторів.

Всі вектори, включаючи батьківські та нащадкові, впорядковуються по убутанні помилки. Якщо кількість векторів перевищує  $S$ , популяція зменшується до  $S$ . Якщо поточна ітерація менше  $N$ , то переходимо до дії 3.

*Дія 6.* Скорочення розмірності простору ознак.

На даному етапі використовується удосконалений генетичний алгоритм для скорочення простору ознак, що розроблений в роботі [437]

Для генетичного алгоритму [437] скорочення розмірності вхідними даними алгоритму є таблиця спостережень, параметри алгоритму та масив хромосом.

*Дія 7.* Навчання баз знань.

В зазначеному дослідженні для навчання баз знань використовується розроблений у дослідженні [435] метод навчання на основі штучних нейронних мереж, що еволюціонують.

Кінець алгоритму.

Запропонований метод пошуку рішень з використанням популяційного алгоритму глобальної пошукової оптимізації.

Проведено моделювання роботи запропонованого методу в програмному середовищі MathCad 14 (США). В якості задачі, що вирішувалася при проведенні моделювання був визначення маршруту руху суден в операційних зонах Чорного та Азовського морів в умовах гібридних дій противника.

Перелік гібридних дій, які можуть бути використані проти сил (військ) Військово-Морських Сил у ході виконання ними завдань захисту економічної діяльності держави на морі в умовах гібридних дій наступний:

- закриття для плавання морських районів, через які проходять рекомендовані шляхи руху суден;

- порушення норм міжнародного морського права;

- радіоелектронне придушення систем управління та зв'язку сил (військ) ВМС;

- кібернетичний вплив на систему управління та зв'язку сил (військ) ВМС;

- диверсійні дії проти сил (військ) ВМС та об'єктів економічної діяльності держави;

- спеціальні дії проти сил (військ) ВМС та об'єктів економічної діяльності держави;

- інформаційно-психологічний вплив на особовий склад сил (військ) ВМС.

Рух суден поза межами рекомендованих шляхів потребує проведення заходів здійснення їх захисту силами (військами) ВМС через:

- імовірність наявності морських мін на таких маршрутах;

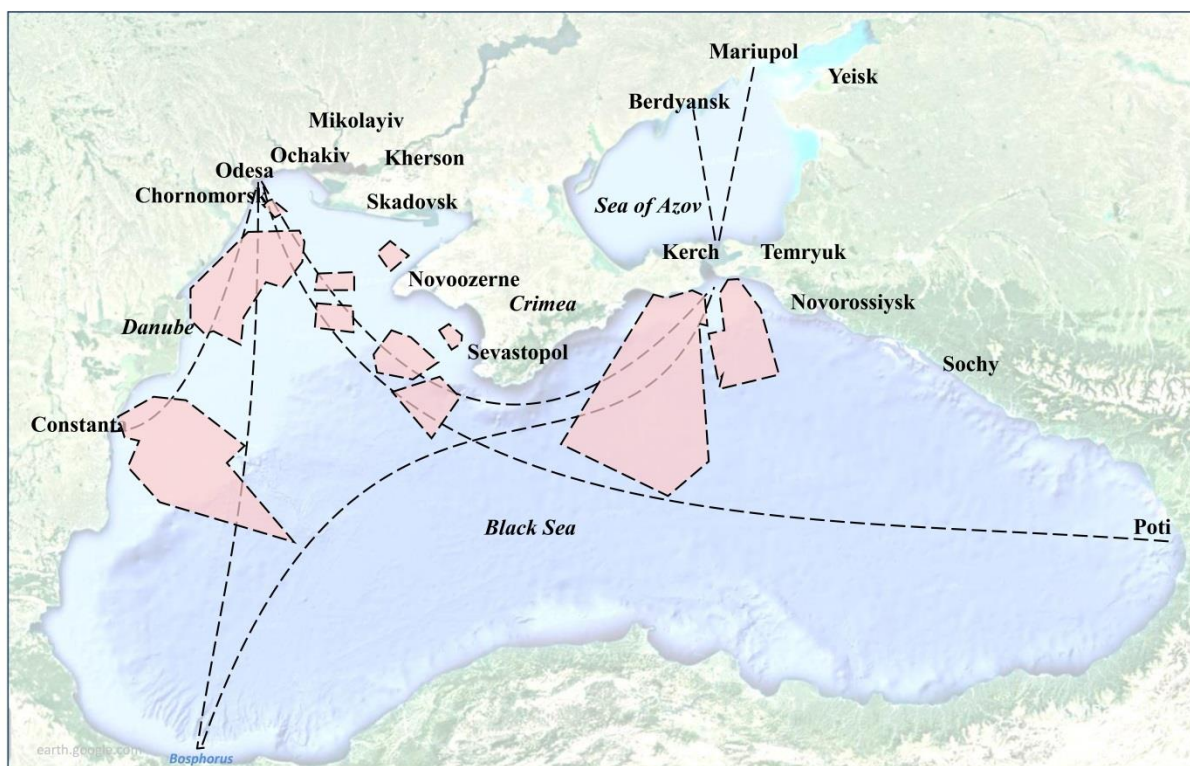
- можливість здійснення негативного впливу на торговельне судноплавство, яке здійснюється по новим маршрутам. Негативний вплив це:

– застосування підводних диверсійних сил і засобів противником проти суден з районів проведення навчань, які наближені до нових маршрутів руху суден;

– можливість прихованої постановки противником морських мін нових маршрутах руху суден тощо).

Тоді задача вибору руху суден повинно здійснюватися з застосуванням сил та засобів ВМС ЗС України і зводиться до типової задачі комівояжера, яка полягає у знаходженні найвигіднішого маршруту.

Приклад тимчасового закриття для плавання морських районів Чорного моря під приводом військово-морських навчань станом на 21.09.2021 в ході якого проведено визначення альтернативних маршрутів руху суден наведено на рис. 1



----- рекомендовані шляхи руху суден     морські райони, тимчасово закриті для плавання

Рис. 1 Приклад тимчасового закриття для плавання морських районів Чорного моря під приводом військово-морських навчань станом на 21.09.2021

Кількість ітерацій, мінімальний і максимальний розмір популяції, мінімальна і максимальна кількість насіння, що розкидається, а також початкове і кінцеве стандартне відхилення наведено в табл. 5. Для спрощення та прискорення чисельних експериментів проведено оптимізацію для двовимірних функцій Хіммельблау та Розенброка (табл. 5).

Таблиця 5

Результати оперативності обчислень при пошуку маршруту для функцій Хіммельблау та Розенброка

Назва функції	Кількість ітерацій	Помилка обчислень	
		Канонічний алгоритм	IWO Удосконалений IWO алгоритм
Функція Хіммельблау $f(x, y) = (x^2 + y - 11)^2 + (x + y^2 - 7)^2$	100	$20,9 \cdot 10^{-11}$	180,6
	500	$4,09 \cdot 10^{-11}$	180,6
	1000	$1,9 \cdot 10^{-11}$	180,6
Функція Розенброка $f(x, y) = -a \cdot (y - x^2)^2 - (1 - x^2)^2$	100	0,00746	-0,0019
	500	$12 \cdot 10^{-11}$	-0,000000001
	1000	$4,45 \cdot 10^{-11}$	-0,0000000006

В табл. 6 наведені порівняння ефективності роєвих алгоритмів оптимізації для вирішення завдання прокладення маршруту руху суден по функції Растрігіна.

Таблиця 6

Порівняння ефективності роєвих алгоритмів оптимізації для вирішення завдання прокладення маршруту руху суден по функції Растрігіна.

Назва алгоритму оптимізації	Функція Растрігіна		
	10 параметрів	50 параметрів	100 параметрів
Канонічний алгоритм інвазивних бур'янів [456]	1	1	0,33519
Удосконалений алгоритм інвазивних бур'янів	1	1	0,5
Канонічний алгоритм мурашиних колоній [449]	0,37	0,27	0,18
Канонічний алгоритм зозулі [449]	0,96	0,7	0,29

Продовження таблиці 6

Канонічний алгоритм світлячків [452]	0,62	0,5	0,19
Канонічний алгоритм летючих миш [449, 455]	0,43	0,96	1
Канонічний алгоритм штучних колоній бджіл	0,81	0,49	0,23
Канонічний алгоритм пошуку зграї риб [455]	0,48	0,38	0,11
Канонічний алгоритм рою часток [449, 455]	0,21	0,12	0,06
Випадковий пошук [453]	0,18	0,14	0,07
Канонічний алгоритм зграї сірих вовків [449, 455]	0	0	0

Аналіз результатів, наведених в табл. 6 дозволяють зробити висновок про те, що удосконалений алгоритм інвазивних бур'янів підвищує оперативність обробки даних на рівні 21–27 %.

Ефективність запропонованого методу на відміну від існуючих пояснюється наявністю додаткових процедур та удосконаленням канонічних.

Переваги запропонованого методу обумовлені наступним:

- при виставленні агентів-бур'янів враховується тип невизначеності (дія 2);
- універсальність вирішення завдання аналізу стану об'єктів агентів бур'янів за рахунок ієрархічності їх опису (вирази (11)–(13));
- можливість швидкого пошуку рішень за рахунок одночасного пошуку рішення декількома особинами (дії 1–7);
- адекватністю отриманих результатів (вирази (11)–(13));
- здатність уникнення проблеми локального екстремуму (дії 1–7);
- можливістю глибокого навчання баз знань (дія 7);

Основними перевагами запропонованого методу є:

- має гнучку ієрархічну структуру показників, що дозволяє звести завдання багатокритеріального оцінювання альтернатив до одного критерію або використовувати для вибору вектор показників;
- однозначність отриманої оцінки стану об'єкту аналізу;
- універсальність застосування за рахунок адаптації системи показників в ході роботи;
- не накопичує похибку навчання за рахунок використання процедури навчання;

– можливість комплексного навчання архітектури та параметрів штучних нейронних мереж;

– врахування типу невизначеності вихідних даних при побудові моделей неоднорідного об'єкту аналізу;

– можливість пошуку рішення за декількома напрямками;

– висока достовірність отриманих рішень при пошуку рішення у декількох напрямках;

– скорочення простору ознак при оцінці стану об'єкту аналізу з використанням удосконаленого генетичного алгоритму;

– відсутність попадання в пастку локального оптимуму.

До недоліків запропонованого методу слід віднести:

– втрата інформативності при оцінюванні стану об'єкту аналізу за рахунок побудови функції належності;

– менша точність оцінювання по окремо взятому параметру оцінки стану об'єкту аналізу;

– втрата достовірності отриманих рішень при пошуку рішення в декількох напрямках одночасно;

– менша точність оцінювання порівняно з іншими методами оцінки.

Зазначений метод дозволить:

– провести оцінку стану неоднорідного об'єкту аналізу;

– визначити ефективні заходи для підвищення ефективності управління;

– підвищити швидкість оцінки стану неоднорідного об'єкту аналізу;

– зменшити використання обчислювальних ресурсів систем підтримки прийняття рішень.

Обмеженнями дослідження є необхідність наявності початкової бази даних про стан об'єкту аналізу, необхідність врахування часу затримки на збір та доведення інформації від джерел розвідувальних відомостей.

Запропонований підхід доцільно використовувати для вирішення задач оцінки складних та динамічних процесів, що характеризуються високим ступенем складності.



Напрями подальших досліджень слід спрямувати на зменшення обчислювальних витрат при обробці різнотипних даних в системах спеціального призначення.

### **9.6.3 Розробка методу пошуку рішень з використанням удосконаленого алгоритму косяків риб**

Алгоритм, що пропонується, є удосконаленим алгоритмом косяків риб та складається з такої послідовності дій.

*Дія 1. Введення вихідних даних.* На даному етапі вводяться вихідні дані, що наявні про об'єкт, що підлягає аналізу. Також відбувається ініціалізація наявної моделі об'єкту аналізу. На цьому етапі виконується заповнення матриці рішення  $D$ : кожен стовпець заповнюється підмножиною  $F_k$ .

*Дія 2. Оброблення вихідних даних з урахуванням ступеню невизначеності.*

На даному етапі відбувається врахування типу невизначеності про об'єкт, що підлягає аналізу та проводиться ініціалізація базової моделі стану об'єкту, що підлягає аналізу [435, 452, 454]. При цьому ступінь невизначеності може бути: повна інформованість; часткова невизначеність та повна невизначеність. Зазначене здійснюється за допомогою корегувальних коефіцієнтів.

*Дія 3. Індивідуальна стадія плавання агентів.* Для кожного агента виконується пошук найкращого рішення на околицях даного рішення. Оскільки для такого типу завдань неможливо визначити поняття околиці рішення, розглянемо цю процедуру. При виборі джерела годування враховується ступінь зашумленості про стан об'єкту оцінювання. Ступінь зашумленості визначається як повна зашумленість, часткова зашумленість та достовірність.

*Дія 3.1.* На першому етапі розглядається кожен стовпець матриці рішень  $D$ . У кожному стовпчику міняються місцями елементи  $d_{ik}$  та  $d_{ik+1}$ , де  $i$  – номер стовпчика,  $k$  – непарне число.

*Дія 3.2.* Другий етап аналогічний першому, з тією різницею, що  $k$  – парне число.

*Дія 4. Перевірка функції придатності знайденого рішення.* Якщо функція придатності покращилася, то вважаємо, що переміщення відбулося. Якщо AP вийшла за межі акваріума – вважаємо, що переміщення не було.

*Дія 5. Процедура годівлі AP.* На цьому етапі необхідно закріпити покращення поточного рішення AP щодо інших AP у косяку за допомогою генетичного алгоритму, розробленого в роботі [455]. Для цього використовується така властивість AP як її вага:  $W = \frac{\Delta f_i}{\max \Delta f_i}$ , де  $\Delta f_i$  – це величина поліпшення значення функції придатності для  $i$ -ного AP.

*Дія 6. Інстинктивно-колективне плавання AP.* На кожного AP впливає вся популяція загалом, причому вплив окремого AP пропорційно його успіхам в індивідуальній стадії плавання. Після цього вся популяція зміщується на величину кроку міграції, що характеризує переміщення всього косяка AP.

Для обчислення кроку міграції необхідно розглянути процес переміщення одного AP у напрямку іншого [457–463]. Нехай поточне рішення для цієї AP –  $D_1$ . Для того, щоб зробити переміщення до AP, що має рішення  $D_0$ , необхідно послідовно переглянути стовпці матриці  $D_0$  зліва направо. У кожному стовпці необхідно з'ясувати відносне розташування елементів  $d_{ik}$  і  $d_{ik+1}$ , де  $i$  – номер стовпа,  $k$  – непарне число. Якщо в матриці  $D_1$  розташування елементів  $d_{ik}$  і  $d_{ik+1}$  не збігається з положенням  $D_0$ , то проводиться обмін місцями даних елементів. Якщо один з елементів дорівнює нулю, то заміна елементів у  $D_1$  буде проведена в тому випадку, якщо модуль різниці між кількістю нулів над ненульовим елементом у матриці  $D_0$  та кількістю нулів над ненульовим елементом у матриці  $D_1$  стане меншим [464–459]. Переміщення із заданою ймовірністю  $\alpha$  – це переміщення, при якому порівняння та обмін місцями елементів  $d_{ik}$  та  $d_{ik+1}$  у матрицях  $D_0$  та  $D_1$  проводиться з ймовірністю  $\alpha$ .

Для обчислення кроку міграції необхідно для кожної риби виконати переміщення із заданою ймовірністю  $\alpha$ . Для цього обчислюється сума

$Sum = \sum_1^N \Delta f_i$  – сума поліпшень функції придатності для кожного AP в популяції.

Тоді кожен AP у косяку переміститься до інших AP з ймовірністю  $\alpha = \frac{\Delta f_i}{Sum}$ .

*Дія 7. Обчислення центру тяжіння косяка.* Даний етап є підготовчим для наступного етапу алгоритму і полягає у обчисленні зваженого рішення стосовно загальної ваги всього косяка. В даному випадку обчислення барицентру виконується наступним чином: агенти впорядковуються в міру зменшення ваги; починаючи з AP, вага якого найменша відбувається переміщення із заданою ймовірністю  $\rho$  до найбільш важкого AP. Результат такого переміщення і є барицентр. Ймовірність  $\rho$  – керований параметр.

*Дія 8. Колективно-вольове плавання AP.* На даному етапі алгоритму з'ясується те, як змінилася вага косяка риби порівняно з попередньою ітерацією. Якщо він збільшився, отже населення наблизилось до області максимуму функції, тому необхідно звужити коло його пошуку, тим самим виявляються інтенсифікаційні властивості. І навпаки: якщо вага косяка зменшилася, значить агенти шукають максимум не в тому місці, тому необхідно змінити напрямок траєкторії та виявити диверсифікаційні властивості.

Для цієї стадії необхідно визначити дистанцію між двома AP. Визначення дистанції відбувається у два етапи.

*Дія 8.1.* На першому етапі необхідно послідовно переглянути стовпці матриці  $D$  зліва направо. У кожному стовпці необхідно з'ясувати відносне розташування елементів  $d_{ik}$  та  $d_{ik+1}$ , де  $i$  – номер стовпа,  $k$  – непарне число. Якщо в матриці  $D_{barycenter}$  – матриці рішення агента, відповідного обчисленому раніше барицентру – розташування елементів  $d_{ik}$  та  $d_{ik+1}$  не збігається, то ступінь відмінності зростає на 1, інакше – не зростає.

*Дія 8.2.* Другий етап проводиться при  $k$  – парне число. Ступінь різниці і є дистанцією між двома агентами.

Колективно-вольове плавання відбувається за допомогою переміщення в напрямку барицентру AP з ймовірністю  $\beta = collStep * rand(0;1) * \frac{dist}{\max(dist)}$ , де  $dist$

– відстань між поточним агентом і барицентром,  $\max(dist)$  – максимальна відстань між AP у косяку та барицентром,  $collStep$  – крок вільного зміщення,  $rand(0,1)$  – випадкове число від 0 до 1.

*Дія 9. Зміна параметрів плавання AP.* На цьому етапі змінюється крок індивідуального переміщення кожного AP залежно від номера ітерації. Ця процедура застосовується для підвищення ефективності алгоритму і більш швидкої збіжності.

*Дія 10. Навчання баз знань AP.*

В зазначеному дослідженні для навчання баз знань кожного AP використовується розроблений у дослідженні [435] метод навчання на основі штучних нейронних мереж, що еволюціонують.

Кінець алгоритму.

Запропонований метод пошуку рішень з використанням удосконаленого алгоритму косяків риб. Для оцінки ефективності розробленого методу виконано її порівняльну оцінку результатами досліджень, викладених в роботах [436–439, 456, 457, 470].

Проведено моделювання роботи методу обробки пошуку рішень відповідно дій 1–10. Проведено моделювання роботи запропонованого методу в програмному середовищі MathCad 14 (США). В якості задачі, що вирішувалася при проведенні моделювання, була оцінка елементів оперативної обстановки угруповання військ (сил).

Вихідні дані для оцінки стану оперативної обстановки з використанням удосконаленого методу:

– кількість джерел інформації, про стан об'єкту моніторингу – 3 (засоби радіомоніторингу, засоби дистанційного зондування землі та безпілотні літальні апарати) Для спрощення моделювання було взято однакову кількість кожного засобу – по 4 засоби;

– кількість інформаційних ознак по яким відбувається визначення стану об'єкту моніторингу – 12. До таких параметрів відносяться: належність, тип організаційно-штатного формування, пріоритетність, мінімальна ширина по

фронту, максимальна ширина по фронту. Також враховується кількість особового складу, мінімальна глибина по флангу, максимальна глибина по флангу, кількість зразків озброєння та військової техніки (ОВТ), кількість типів зразків ОВТ та кількість засобів зв'язку), тип оперативної побудови;

– варіанти організаційно-штатних формувань – рота, батальйон, бригада.

Результати порівняльної оцінки по критерію оперативності оцінювання з відомими науковими дослідженнями наведені в таблиці 7.

Таблиця 7

Результати розв'язання задачі

№ ітерації	Метод гілок та границь [450]	Генетичний алгоритм [445]	Канонічний алгоритм риб [456]	Удосконалений алгоритм риб
<i>N</i>	<i>T</i> , с	<i>T</i> , с	<i>T</i> , с	<i>T</i> , с
5	1,125	1,125	1,125	1,05
10	0,625	0,625	0,625	0,450
15	48,97	58,20	58,28	55,71
20	106,72	44,29	43,75	41,33
30	-0,1790	-0,0018	-0,0002	-0,00008
40	-0,158	-0,070	-0,069	-0,08
50	97,76	-974,30	-3,72	-331,18
100	-133,28	-195,71	-196,24	-198,12
200	<b>7980,89</b>	<b>7207,49</b>	<b>7198,43</b>	<b>7022,85</b>

Як видно з табл. 7, виграш зазначеного методу пошуку рішень складає від 11 до 15 % по критерію оперативності обробки даних.

Переваги запропонованого методу обумовлені наступним:

- при виставленні АР враховується тип невизначеності (дія 2);
- універсальність вирішення завдання аналізу стану об'єктів АК за рахунок ієрархічності їх опису (дії 1–10);
- можливість швидкого пошуку рішень за рахунок одночасного пошуку рішення декількома особинами (дії 1–10, табл. 7);
- адекватністю отриманих результатів (дії 1–10);

- здатність уникнення проблеми локального екстремуму (дії 1–10);
- можливістю глибокого навчання баз знань AP (дія 10).

До недоліків запропонованого методу слід віднести:

- втрата інформативності при оцінюванні стану об'єкту аналізу за рахунок побудови функції належності;
- менша точність оцінювання по окремо взятому параметру оцінки стану об'єкту аналізу;
- втрата достовірності отриманих рішень при пошуку рішення в декількох напрямках одночасно;
- менша точність оцінювання порівняно з іншими методами оцінки.

Зазначений метод дозволить:

- провести оцінку стану неоднорідного об'єкту аналізу;
- визначити ефективні заходи для підвищення ефективності управління;
- підвищити швидкість оцінки стану неоднорідного об'єкту аналізу;
- зменшити використання обчислювальних ресурсів систем підтримки прийняття рішень.

Обмеженнями дослідження є необхідність наявності початкової бази даних про стан об'єкту аналізу, необхідність врахування часу затримки на збір та доведення інформації від джерел розвідувальних відомостей.

Запропонований підхід доцільно використовувати для вирішення задач оцінки складних та динамічних процесів, що характеризуються високим ступенем складності.

Зазначене дослідження є подальшим розвитком досліджень, що спрямовані на розробку методологічних засад підвищення ефективності обробки різнотипних даних, що опубліковані вже раніше [435, 437–439, 456].

Напрями подальших досліджень слід спрямувати на зменшення обчислювальних витрат при обробці різнотипних даних в системах спеціального призначення.

#### 9.6.4 Розробка методу пошуку рішень з використанням удосконаленого алгоритму стрибаючих жаб

Метод пошуку рішень з використанням удосконаленого алгоритму стрибаючих жаб складається з такої послідовності дій.

*Дія 1. Введення вихідних даних.* На даному етапі вводяться вихідні дані, що наявні про об'єкт, що підлягає аналізу. Також відбувається ініціалізація наявної моделі об'єкту аналізу. Ініціація початкової популяції агентів жаб (АЖ) представляється, як множина точок простору перестановок  $S_n$  з метрикою Кендалла виду  $S = (s_1, s_2, \dots, s_n)$ . Кожен елемент вектору відповідає ознакам таблиці спостереження,  $n$  – кількість ознак. Значення елемента вектора  $s_i = 0$  показує, що  $i$ -та ознака не бере участі в класифікації,  $s_i = 1$  означає, що перша ознака використовується класифікатором. В зазначеній дії запропоновано модифікацію алгебраїчних операцій, що дозволяє алгоритму оперувати бінарними вхідними векторами, оскільки всі арифметичні оператори замінюються логічними. Відповідно до цієї ідеї операції множення, додавання та віднімання замінюються на кон'юнкцію, диз'юнкцію та сувору диз'юнкцію відповідно:

$$S^* = r \wedge (S_b \oplus S_w) \vee S_w \quad (13)$$

де  $\mathbf{r}$  – довільний бінарний вектор.

*Дія 2. Оброблення вихідних даних з урахуванням ступеню невизначеності.*

На даному етапі відбувається врахування типу невизначеності про об'єкт, що підлягає аналізу та проводиться ініціалізація базової моделі стану об'єкту, що підлягає аналізу [435, 452, 454]. При цьому ступінь невизначеності може бути: повна інформованість; часткова невизначеність та повна невизначеність. Зазначене здійснюється за допомогою корегувальних коефіцієнтів.

*Дія 3. Обчислення значення критерію оптимальності кожної перестановки із початкової популяції АЖ.* Зазначена процедура здійснюється за допомогою удосконаленого генетичного алгоритму, розробленого авторами в роботі [455].

Дія 4. Упорядкування рішення у порядку зменшення значення критерію оптимальності.

Дія 5. Глобальний пошук АЖ.

Процедура полягає у сортуванні вхідних векторів за значенням фітнес-функції та розбиттям популяції АЖ на підгрупи. У середині кожної підгрупи незалежно здійснюється локальний пошук, у якому відбувається оновлення найгірших векторів.

У фітнес-функції важливо враховувати як якість побудови моделі класифікації, так і частку відібраних ознак з метою зменшення їх кількості:

$$Fit(\mathbf{S}) = \alpha \times Error(\mathbf{S}) + (1 - \alpha) \times \frac{n^*}{n}, \quad (14)$$

де  $Error(\mathbf{S})$  – помилка класифікації на векторі  $\mathbf{S}$ ,  $n^*$  – кількість елементів у векторі  $\mathbf{S}$ , рівних одиниці,  $\alpha$  – коефіцієнт пріоритету однієї частини функції над іншою.

Оновлення векторів відбувається за наступним принципом. Вибираються  $\mathbf{Z}_b$  та  $\mathbf{Z}_w$  – вектори з кращим та найгіршим значенням фітнес-функції у групі. Далі обчислюється проміжний вектор  $\mathbf{Z}^*$ :

$$\mathbf{Z}^* = r \times c \times (\mathbf{Z}_b - \mathbf{Z}_w) + \mathbf{Z}_w, \quad (15)$$

де  $r$  – рівномірно розподілене випадкове число із проміжку від 0 до 1,  $c$  – коефіцієнт оновлення вектору. Якщо значення фітнес-функції вектору  $\mathbf{Z}^*$  перевищує фітнес-функцію вектору  $\mathbf{Z}_w$ ,  $\mathbf{Z}^*$  заміщає  $\mathbf{Z}_w$ . В іншому випадку вектор  $\mathbf{Z}^*$  обчислюється заново, але замість  $\mathbf{Z}_b$  використовується глобальний найкращий вектор  $\mathbf{Z}_0$ . Якщо й у цьому випадку не вдається поліпшити вектор  $\mathbf{Z}_w$ , він перезаписується з випадково згенерованим відхиленням.

Алгоритм приймає на вхід такі параметри: число підгруп  $G$ , число векторів у цій групі  $F$ , коефіцієнт оновлення вхідних векторів  $c$ , кількість ітерацій для глобального і локального пошуку  $T_{gl}$  та  $T_k$  відповідно.

Розділення рішень АЖ на блоки-мемплекси таким чином, що перший у відсортованому списку АЖ потрапляє до першого мемплексу, другий АЖ



заноситься до другого мемплексу і т.п. Так триває доки всі АЖ не будуть розподілені в вказана кількість мемплексів.

*Дія 6. Регулювання швидкості руху АЖ.*

У кожному мемплексі з номером  $k \in \{1, 2, \dots, K\}$  знайти найкраще  $s_{k1}$  та найгірше  $s_{k2}$  рішення. Для виконання даної дії необхідна наявність деякого безперервного вектора, який характеризує ознаки. Найчастіше таким вектором є вектор швидкості. В кананічному алгоритмі СЖ такого вектора немає, тому пропонується розраховувати швидкість найгіршого вектора  $S_w$  наступним чином:

$$\mathbf{V} = (\mathbf{S}_0 - \mathbf{S}_w) \times \mathbf{r}_1 + (\mathbf{S}_b - \mathbf{S}_w) \times \mathbf{r}_2, \quad (16)$$

де  $\mathbf{r}_1$  і  $\mathbf{r}_2$  – вектори, заповнені випадковими речовими значеннями в діапазоні від 0 до 1. Далі отриманого значення необхідно поставити у відповідність бінарний еквівалент.

*Дія 6.1* На першому кроці функція трансформації, приймаючи на вхід значення швидкості елемента вектору  $S_w$ , обчислює число, яке належить діапазону [433, с.1].

*Дія 6.2* Безпосереднє оновлення елементів відповідно до трансформаційного правила.

Вирізняють кілька сімейств функцій трансформації. Два найбільш часто використовуваних сімейства мають S- і V-подібні графіки. Як S-подібна функція трансформації була використана базова версія сигмоїди:

$$F_1(v_i) = 1 / (1 + e^{-v_i}), \quad (17)$$

де  $v_i$  – значення швидкості  $i$ -го елемента.

V-подібні функції мають велику різноманітність варіацій, тому для дослідження були обрані дві функції. Перша обчислюється за допомогою гіперболічного тангенсу:

$$F_2(v_i) = |\tanh(v_i)|, \quad (18)$$

друга задається наступним виразом:

$$F_3(v_i) = \left| v_i / \sqrt{1 + v_i^2} \right| \quad (19)$$

Трансформаційні правила відрізняються принципом оновлення елементів.

У першому правилі  $R_1$  елементу суворо надається бінарне значення:

$$\text{якщо } rand < F(v_i), \text{ то } s_i = 1, \text{ інакше } s_i = 0, \quad (20)$$

де  $F(v_j)$  – одна з трьох функцій трансформації,  $rand$  – рівномірно розподілене випадкове число,  $rand \in [0; 1]$ . Друге правило  $R_2$  або замінює елемент на протилежний, або не змінює його:

$$\text{якщо } rand < F(v_i), \text{ то } s_i = s_i \oplus 1 \quad (21)$$

*Дія 7. Покращення положення АЖ у просторі пошуку.* Покращення положення найгіршого АЖ шляхом переміщення його у напрямку кращого АЖ з урахуванням ступеню зашумленості вихідних даних [436]. Це відбувається застосування оператора кросоверу  $s = Cross(s_{k1}, s_{k2})$ .

*Дія 8. Поліпшення умов роботи АСЖ.*

Якщо попередня операція не покращує рішення, спробувати поліпшити положення найгіршого АЖ шляхом переміщення його в напрямку глобально кращого АЖ  $s = Cross(s_{k1}, s_{11})$ .

*Дія 9. Перестановка АЖ.*

Якщо і остання операція не призводить до покращення позиції АЖ, то замість АЖ випадковим чином створити в області пошуку нового АЖ – перестановку.

*Дія 10. Об'єднання АЖ всіх мемплексів в одну групу.*

Функція поелементно порівнює два бінарні вектори; якщо значення елемента на одній і тій самій позиції збігається, то в результуючому векторі на цю позицію запишеться дане значення. В іншому випадку здійснюється генерація випадкового числа з інтервалу від 0 до 1 [24–30]. Якщо воно менше або дорівнює 0,5, то відповідну позицію нового вектора записується елемент з гіршого вектора. В іншому випадку на цьому місці буде виставлений елемент із кращого вектора.

Таким чином, функція злиття може бути задана таким чином:

$$\text{merge}(S_w, S_b) = \begin{cases} s_i^* = s_{wi} = s_{bi}, \text{ якщо } s_{wi} = s_{bi} \\ s_i^* = s_{wi}, \text{ якщо } s_{wi} \neq s_{bi} \text{ та } \text{rand} \leq 0,5, \\ s_i^* = s_{bi}, \text{ якщо } s_{wi} \neq s_{bi} \text{ та } \text{rand} > 0,5 \end{cases} \quad (22)$$

де  $\text{rand}$  – випадкове рівномірно розподілене число,  $\text{rand} \in [0;1]$ .

*Дія 11.* Якщо умови завершення алгоритму не виконані, то перехід до дії 3.

*Дія 12.* Пошук найкращого АЖ.

Останній глобально найкращий АЖ відповідає субоптимальному рішення задачі.

*Дія 13.* Навчання баз знань АЖ.

В зазначеному дослідженні для навчання баз знань кожного АЖ використовується розроблений у дослідженні [435] метод навчання на основі штучних нейронних мереж, що еволюціонують.

Кінець алгоритму.

Запропонований метод пошуку рішень з використанням удосконаленого АСЖ.

Проведено моделювання роботи методу пошуку рішень відповідно дій 1–13. Проведено моделювання роботи запропонованого методу в програмному середовищі MathCad 14 (США). В якості задачі, що вирішувалася при проведенні моделювання була оцінка елементів оперативної обстановки угруповання військ (сил).

В моделюванні використано дворазову крос-валідацію. На кожній вибірці алгоритм запускався 30 разів. Отримані показники якості класифікації були усереднені за кількістю запусків та двома вибірками кожного підпису. Знімалися такі показники: загальна точність, помилка I роду (False Rejection Rate, FRR), помилка II роду (False Acceptance Rate, FAR) та кількість ознак, що залишилися в наборі.

Структура класифікатора генерувалася алгоритмом з урахуванням екстремальних значень класів. У якості термів були обрані трикутні функції приладдя. Параметри АСЖ наступні: кількість груп дорівнює 4, у кожній з них по 10 векторів; локальних ітерацій 5, глобальних ітерацій 50. Коефіцієнт у

фітнес-функції дорівнював 0,5. У таблиці 8 представлений перелік використаних в АСЖ способів бінарizaції та їх позначення.

Таблиця 8 – Нумерація бінарizaції АСЖ.

Метод		Метод	
MAO	Модифіковані алгебраїчні операції (3)	F3R2	Функція трансформації $F_3$ (9) + правило $R_2$ (11)
merge	Операція злиття (4)	F1R1m	Функція трансформації $F_1$ (7) + правило $R_1$ (10) + операція злиття
MAOm	Модифіковані алгебраїчні операції + операція злиття (5)	F2R1m	Функція трансформації $F_2$ (8) + правило $R_1$ (10) + операція злиття
F1R1	Функція трансформації $F_1$ (7) + правило $R_1$ (10)	F3R1m	Функція трансформації $F_3$ (9) + правило $R_1$ (10) + операція злиття
F2R1	Функція трансформації $F_2$ (8) + правило $R_1$ (10)	F1R2m	Функція трансформації $F_1$ (7) + правило $R_2$ (11) + операція злиття
F3R1	Функція трансформації $F_3$ (9) + правило $R_1$ (10)	F2R2m	Функція трансформації $F_2$ (8) + правило $R_2$ (11) + операція злиття
F1R2	Функція трансформації $F_1$ (7) + правило $R_2$ (11)	F3R2m	Функція трансформації $F_3$ (9) + правило $R_2$ (11) + операція злиття
F2R2	Функція трансформації $F_2$ (8) + правило $R_2$ (11)		

У таблиці 9 містяться одержані показники класифікації на тестових вибірках. Жирним шрифтом відзначені найкращі результати за показником.

Таблиця 9 – Результати побудови нечіткого класифікатора на підмножинах ознак, відібраних АСЖ.

Метод	Точність	FRR	FAR	Ознаки
MAO	83,9±7,5	25,1±14,0	7,1±8,1	43,9±4,3
merge	86,7±6,9	20,2±13,0	6,3±7,6	34,2±3,6
MAOm	85,5±7,7	21,1±14,3	7,9±9,2	20,5±4,1
F1R1	85,2±7,4	23,0±13,3	6,5±8,0	40,4±4,1
F2R1	85,6±7,3	21,9±13,5	7,0 ± 8,2	28,0±4,2

Продовження таблиці 9

F3R1	86,1±7,2	20,7±13,7	7,0±8,3	24,6±4,3
F1R2	83,8±7,6	25,4±14,2	7,1±8,2	43,5±4,1
F2R2	87,0±7,2	19,3±13,3	6,8±8,1	30,0±4,0
F3R2	<b>87,1± 7,0</b>	19,4±13,1	6,4±7,7	31,1 ± 4,0
F1R1m	85,3±7,3	23,2±13,5	<b>6,2± 7,8</b>	39,1±3,9
F2R1m	85,9±7,5	20,1±13,9	8,0±9,3	19,7±5,1
F3R1m	85,6±7,7	20,1±14,1	8,6±9,6	<b>17,6± 4,6</b>
F1R2m	84,2±7,4	24,2±13,6	7,5±8,6	44,8±4,1
F2R2m	<b>87,1± 7,0</b>	<b>19,0± 12,9</b>	6,9±8,1	29,4±4,0
F3R2m	86,7±6,9	20,0 ± 13,0	6,7±7,9	30,1±3,9

Середні ранги, отримані при порівнянні результатів за всіма користувачами критерієм Фрідмана, представлені у таблиці 10.

Таблиця 10 – Середні ранги за критерієм Фрідмана

Метод	Точність	FRR	FAR	Ознаки
MAO	4,8	11,3	7,8	13,9
merge	10,9	6,2	6,1	10,0
MAOm	5,9	8,9	10,5	2,8
F1R1	8,1	9,2	6,4	11,9
F2R1	7,1	9,0	8,4	5,3
F3R1	8,0	8,0	8,1	4,0
F1R2	4,7	12,1	7,5	13,5
F2R2	11,0	4,6	7,3	7,4
F3R2	11,6	5,1	5,7	8,9
F1R1m	8,4	9,7	5,3	11,1
F2R1m	6,9	7,4	11,0	2,2
F3R1m	6,1	7,6	12,0	1,0
F1R2m	5,5	10,2	8,9	14,6
F2R2m	11,1	4,6	8,0	6,0
F3R2m	10,1	6,2	7,1	7,5

Найкращі результати загальної точності продемонстрували V-подібні функції трансформації з правилом  $R_2$  (23). При цьому функція  $F_2$  (21) показала найкращий результат у комбінації з операцією злиття, а функція  $F_3$  (22) – індивідуально. Помилка першого роду виявилася найменшою під час використання  $F_2$  з правилом  $R_2$  як за відсутності так і за наявності операції

злиття. Найменша помилка другого роду була отримана за допомогою  $F_1$  (20) та правила  $R_1$  (22) у комбінації з операцією злиття. Найкращу здатність до скорочення ознак продемонструвала функція  $F_3$  із правилом  $R_1$  та операцією злиття.

Результати порівняльної оцінки по критерію оперативності оцінювання наведені в табл. 11.

Таблиця 11 – Результати розв’язання задачі

№ ітерації	Метод гілок та границь [450]	Генетичний алгоритм [445]	Канонічний АСЖ [456]	Удосконалений АСЖ
$N$	$T, c$	$T, c$	$T, c$	$T, c$
5	1,125	1,125	1,125	1,05
10	0,625	0,625	0,625	0,450
15	48,97	58,20	58,28	55,71
20	106,72	44,29	43,75	41,33
30	-0,1790	-0,0018	-0,0002	-0,00008
40	-0,158	-0,070	-0,069	-0,08
50	97,76	-974,30	-3,72	-331,18
100	-133,28	-195,71	-196,24	-198,12
200	<b>7980,89</b>	<b>7207,49</b>	<b>7198,43</b>	<b>7022,85</b>

Як видно з табл. 11, виграш зазначеного методу пошуку рішень складає від 14 до 18 % по критерію оперативності обробки даних.

Основними перевагами запропонованого методу є:

- має гнучку ієрархічну структуру показників, що дозволяє звести завдання багатокритеріального оцінювання альтернатив до одного критерію або використовувати для вибору вектор показників;

- меншою помилкою оцінювання стану об’єкту за рахунок удосконаленої процедури трансформації;

- однозначність отриманої оцінки стану об’єкту аналізу;

- універсальність застосування за рахунок адаптації системи показників в

ході роботи;

– не накопичує похибку навчання за рахунок використання процедури навчання;

– можливість комплексного навчання архітектури та параметрів штучних нейронних мереж;

– врахування типу невизначеності вихідних даних при побудові моделей неоднорідного об'єкту аналізу;

– можливість пошуку рішення за декількома напрямками;

– висока достовірність отриманих рішень при пошуку рішення у декількох напрямках;

– відсутність попадання в пастку локального оптимуму.

Обмеженнями дослідження є необхідність наявності початкової бази даних про стан об'єкту аналізу, необхідність врахування часу затримки на збір та доведення інформації від джерел розвідувальних відомостей.

Переваги запропонованого методу обумовлені наступним:

– при виставленні АЖ враховується тип невизначеності (дія 2);

– під час руху АЖ враховується ступінь зашумленості даних про стан об'єкту;

– універсальність вирішення завдання аналізу стану об'єктів АК за рахунок ієрархічності їх опису (дії 1–13);

– можливість швидкого пошуку рішень за рахунок одночасного пошуку рішення декількома особинами (дії 1–13);

– адекватністю отриманих результатів (дії 1–13);

– здатність уникнення проблеми локального екстремуму (дії 1–13);

– врахуванням ступеню зашумленості даних про стан об'єкту під час руху АЖ (дія 7);

– використанням удосконаленої процедур бінаризації (дія 1, вираз (13));

– розрахунком швидкості АЖ (дія 6, вирази (16), (17));

– можливістю глибокого навчання баз знань АЖ (дія 13).

До недоліків запропонованого методу слід віднести:

– втрата інформативності при оцінюванні стану об'єкту аналізу за рахунок побудови функції належності;

– менша точність оцінювання по окремо взятому параметру оцінки стану об'єкту аналізу;

– втрата достовірності отриманих рішень при пошуку рішення в декількох напрямках одночасно;

– менша точність оцінювання порівняно з іншими методами оцінки.

Зазначений метод дозволить:

– провести оцінку стану неоднорідного об'єкту аналізу;

– визначити ефективні заходи для підвищення ефективності управління;

– підвищити швидкість оцінки стану неоднорідного об'єкту аналізу;

– зменшити використання обчислювальних ресурсів систем підтримки прийняття рішень.

Запропонований підхід доцільно використовувати для вирішення задач оцінки складних та динамічних процесів, що характеризуються високим ступенем складності.

Зазначене дослідження є подальшим розвитком досліджень, що спрямовані на розробку методологічних засад підвищення ефективності обробки різнотипних даних, що опубліковані вже раніше [435, 437–439, 456].

Напрями подальших досліджень слід спрямувати на зменшення обчислювальних витрат при обробці різнотипних даних в системах спеціального призначення.

## **Висновки**

1. Визначено алгоритм реалізації методу, завдяки додатковим та удосконаленим процедурам що дозволяє:

– враховується тип невизначеності та зашумленості даних;

– врахувати наявні обчислювальні ресурси системи аналізу стану об'єкту аналізу;

– врахувати пріоритетність пошуку АК;



- провести початкове виставлення особин АК з урахуванням типу невизначеності;
- провести точне навчання особин АК з використанням виразів;
- провести визначення найкращих особин АК за допомогою генетичного алгоритму;
- провести локальний та глобальний пошук з урахуванням ступеню зашумленості даних про стан об'єкту аналізу;
- провести навчання баз знань, що здійснюється шляхом навчання синаптичних ваг штучної нейронної мережі, типу та параметрів функції належності, а також архітектури окремих елементів і архітектури штучної нейронної мережі в цілому;
- застосовувати як універсальний інструмент вирішення завдання аналізу стану об'єктів аналізу за рахунок ієрархічності опису об'єктів аналізу;
- перевірити адекватність отриманих результатів;
- уникнути проблеми локального екстремуму.

2. Проведений приклад використання запропонованого методу на прикладі оцінки та прогнозуванні стану оперативної обстановки угруповання військ (сил). Зазначений приклад показав підвищення ефективності оперативності обробки даних на рівні 13–21 % за рахунок використання додаткових удосконалених процедур додавання корегувальних коефіцієнтів щодо невизначеності та зашумленості даних, відбору АК, а також навчання АК.

3. Визначено алгоритм реалізації методу, що дозволяє:

- враховується тип невизначеності даних;
- врахувати наявні обчислювальні ресурси системи аналізу стану об'єкту аналізу;
- врахувати пріоритетність пошуку агентами-бур'янами;
- провести початкове виставлення особин агентів-бур'янів з урахуванням типу невизначеності;
- провести точне навчання особин агентів-бур'янів;
- зменшити простір ознак при оцінюванні стану об'єкту аналізу за

допомогою удосконаленого генетичного алгоритму;

- провести локальний та глобальний пошук з урахуванням ступеню зашумленості даних про стан об'єкту аналізу;

- провести навчання баз знань, що здійснюється шляхом навчання синаптичних ваг штучної нейронної мережі, типу та параметрів функції належності, а також архітектури окремих елементів і архітектури штучної нейронної мережі в цілому;

- застосовувати як універсальний інструмент вирішення завдання аналізу стану об'єктів аналізу за рахунок ієрархічності опису об'єктів аналізу;

- перевірити адекватність отриманих результатів;

- уникнути проблеми локального екстремуму.

4. Проведений приклад використання запропонованого методу на прикладі виборі маршруту руху суден в операційних зонах Чорного та Азовського морів. Зазначений приклад показав підвищення оперативності обробки даних на рівні 21–27 % за рахунок використання додаткових удосконалених процедур відбору особин та глибокого навчання.

5. Визначено алгоритм реалізації методу, завдяки додатковим та удосконаленим процедурам що дозволяє:

- враховується тип невизначеності та зашумленості даних;

- врахувати наявні обчислювальні ресурси системи аналізу стану об'єкту аналізу;

- врахувати пріоритетність пошуку AP;

- провести початкове виставлення особин AP з урахуванням типу невизначеності;

- провести точне навчання особин AP;

- провести визначення найкращих особин AP за допомогою генетичного алгоритму;

- провести локальний та глобальний пошук з урахуванням ступеню зашумленості даних про стан об'єкту аналізу;

- провести навчання баз знань, що здійснюється шляхом навчання

синаптичних ваг штучної нейронної мережі, типу та параметрів функції належності, а також архітектури окремих елементів і архітектури штучної нейронної мережі в цілому;

– застосовувати як універсальний інструмент вирішення завдання аналізу стану об'єктів аналізу за рахунок ієрархічності опису об'єктів аналізу;

– перевірити адекватність отриманих результатів;

– уникнути проблеми локального екстремуму.

6. Проведений приклад використання запропонованого методу на прикладі оцінки та прогнозуванні стану оперативної обстановки угруповання війсь (сил). Зазначений приклад показав підвищення ефективності оперативності обробки даних на рівні 18–25 % за рахунок використання додаткових удосконалених процедур додавання корегувальних коефіцієнтів щодо невизначеності та зашумленості даних, відбору AP, а також навчання AP.

7. Визначено алгоритм реалізації методу, завдяки додатковим та удосконаленим процедурам що дозволяє:

– враховується тип невизначеності та зашумленості даних;

– врахувати наявні обчислювальні ресурси системи аналізу стану об'єкту аналізу;

– врахувати пріоритетність руху АЖ;

– провести початкове виставлення особин АЖ з урахуванням типу невизначеності;

– провести точне навчання особин АЖ;

– провести визначення найкращих особин АЖ за допомогою генетичного алгоритму;

– провести локальний та глобальний пошук з урахуванням ступеню зашумленості даних про стан об'єкту аналізу;

– провести навчання баз знань, що здійснюється шляхом навчання синаптичних ваг штучної нейронної мережі, типу та параметрів функції належності, а також архітектури окремих елементів і архітектури штучної нейронної мережі в цілому;

- застосовувати як універсальний інструмент вирішення завдання аналізу стану об'єктів аналізу за рахунок ієрархічності опису об'єктів аналізу;
- перевірити адекватність отриманих результатів;
- розрахувати швидкість руху АЖ;
- уникнути проблеми локального екстремуму.

8. Проведений приклад використання запропонованого методу на прикладі оцінки та прогнозуванні стану оперативної обстановки угруповання війсь (сил). Зазначений приклад показав підвищення ефективності оперативності обробки даних на рівні 14–18 % за рахунок використання додаткових удосконалених процедур додавання корегувальних коефіцієнтів щодо невизначеності та зашумленості даних, відбору АЖ, розрахунку швидкості руху АЖ, а також навчання АЖ.

SECTION 10. LIFE SAFETY

DOI: 10.46299/ISG.2024.MONO.TECH.4.10.1

10.1 Prediction of microclimate parameters in working areas when using a humidifier

The totality of parameters that influence the microclimate in work areas and the health of workers. The microclimate of industrial premises is determined by a set of parameters that affect the heat exchange of the human body (Fig. 1).

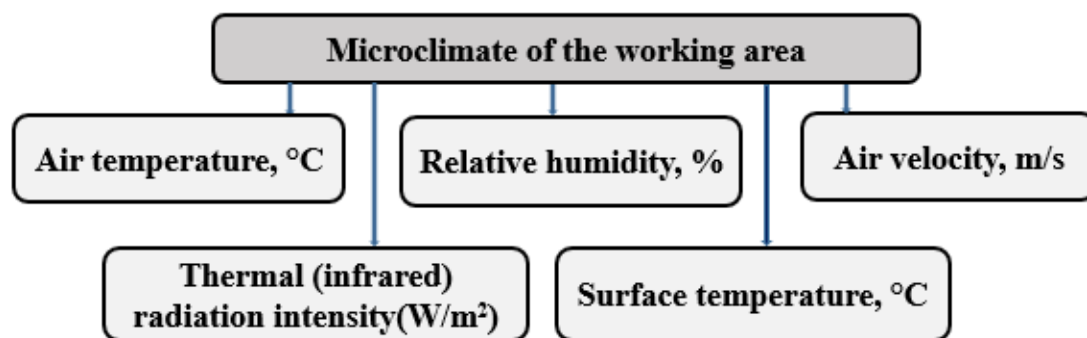
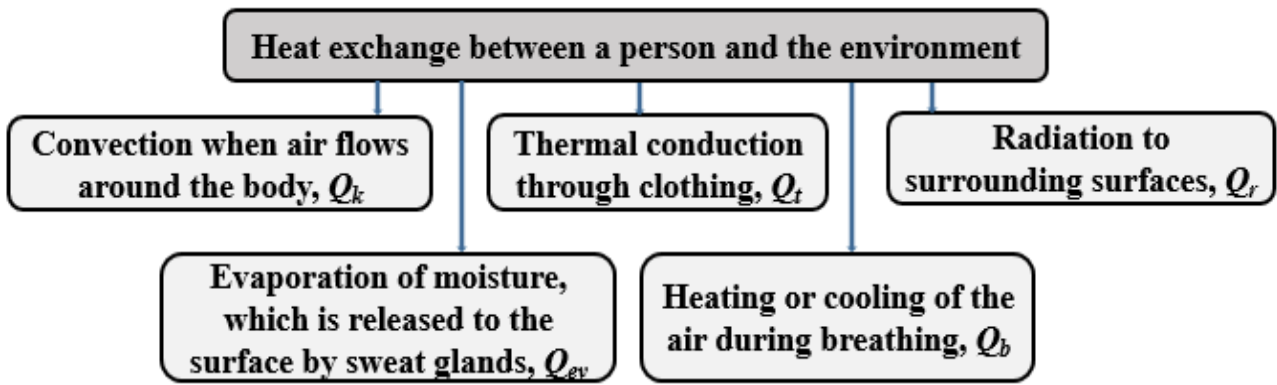


Figure 1. Indicators affecting the microclimate in working areas

Each of the parameters, both separately and in combination with others, affects the physiological functioning of the employee's body, namely the thermoregulation of the body, which determines his well-being and working capacity. When changing external environmental conditions, thermoregulation in the human body occurs due to the strengthening or weakening of physiological processes that cause heat generation in the body and also affect the heat transfer from the human body to the environment. The human body is able to maintain a quasi-stable body temperature with fairly wide fluctuations in environmental parameters.

Heat exchange between a person and the environment  $Q$  is carried out due to thermal processes occurring between a person and the environment, as well as inside the human body (Fig. 2).



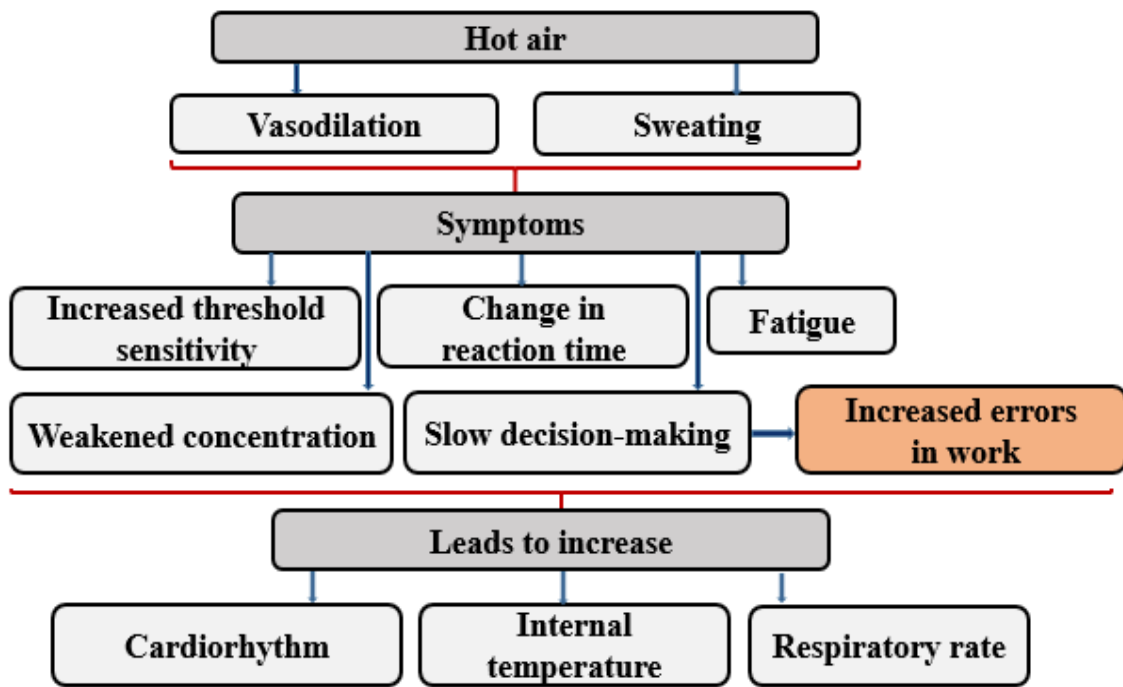
**Figure 2.** Heat exchange between a person and the environment

Although the human body maintains a temperature of about  $36.6^{\circ}\text{C}$  with air temperature fluctuations from  $-40^{\circ}\text{C}$  to  $+40^{\circ}\text{C}$ , the temperature of some areas of the skin and internal organs can vary from  $24^{\circ}\text{C}$  to  $37.1^{\circ}\text{C}$ .

$$Q = Q_k + Q_t + Q_r + Q_{ev} + Q_b \quad (1)$$

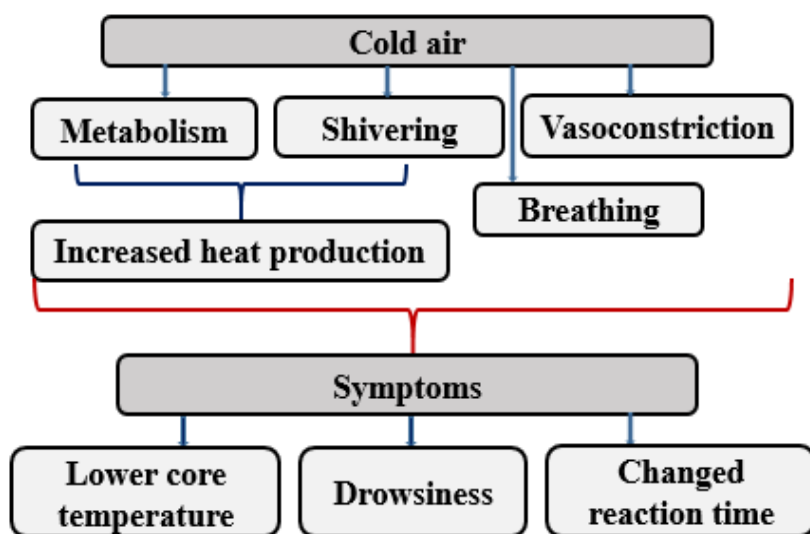
where  $Q_k$  – heat transfer due to convection when air flows around a body;  $Q_t$  – heat transfer by thermal conduction through clothing;  $Q_r$  – heat transfer due to radiation to surrounding surfaces;  $Q_{ev}$  – heat exchange due to the evaporation of moisture, which is brought to the surface by sweat glands;  $Q_b$  – heat exchange due to heating or cooling of air during breathing.

A decrease in the temperature of the air environment leads to an increase in heat transfer by convection and radiation and can cause hypothermia of the body. When the air temperature increases, the opposite situation occurs. At an air temperature of more than  $30^{\circ}\text{C}$ , a person's working capacity begins to fall and heat transfer is practically carried out by sweating and evaporation of moisture. Prolonged exposure to high temperatures in combination with significant humidity leads to the accumulation of heat in the body and to hyperthermia – a condition when the body temperature rises to  $38^{\circ}\text{C}$ – $40^{\circ}\text{C}$ . With hyperthermia, or heat stroke, the symptoms include a headache, dizziness, general weakness, distortion of color perception, dry mouth, nausea, vomiting, sweating. The pulse and respiratory rate accelerate, the content of nitrogen and lactic acid in the blood increases. Pallor, bluish skin, dilated pupils, sometimes convulsions, loss of consciousness are observed (Fig. 3).



**Figure 3.** The effect of high temperature on a human condition

At low temperatures, significant air movement and humidity, the body overcools, which is called hypothermia. At the initial stage of exposure to moderate cold, there is a decrease in the respiratory rate and an increase in the volume of inspiration. With prolonged exposure to cold, breathing becomes irregular, the frequency and volume of inspiration increase, and carbohydrate metabolism changes (Fig. 4).



**Figure 4.** The effect of low temperature on a human condition

Muscle tremors appear, as external work is not performed and all the energy of the tremor is converted into heat. This allows for some time to delay the decrease in the temperature of the internal organs. The consequence of the action of low temperatures is cold injuries.

Air humidity has a significant impact on the thermoregulation of the human body. An increase in relative humidity to 85% complicates thermoregulation, and a decrease to 20% causes discomfort associated with drying out of the mucous membranes and skin. The optimal value of relative humidity is 40–60%.

Air velocity is also an important factor affecting human well-being. In the warm season, moderate air movement promotes heat exchange in the human body and improves its well-being; in the cold season and at low air temperatures, it contributes to hypothermia of the body as a whole and its individual parts, which can lead to frostbite and the occurrence of colds. The minimum air velocity felt by a person is 0.2m/s.

**Normalization of microclimate parameters.** Sanitary and hygienic standardization of the microclimate is carried out in accordance with state sanitary standards, which establish optimal microclimatic conditions and permissible microclimate parameters at workplaces in industrial premises. When setting standards, the total energy expenditure of the body when performing work is taken into account, which depends on the category of work in terms of its difficulty, as well as the time of year. There is a cold period of the year, which is characterized by an average daily outdoor temperature of +10°C and below, and a warm period with a temperature above +10°C. Optimal meteorological conditions apply to the entire working area, and permissible ones are established separately for permanent and non-permanent workplaces. In industrial premises located in areas with an average maximum temperature of the hottest month above 25°C, an increase in the upper limit of the permissible temperature is allowed, but not more than 3°C. In this case, the air speed should be increased by 1.1 m/s, and the relative humidity should be reduced by 5% for each degree exceeding the permissible air temperature limit.



In production premises where it is impossible to establish permissible microclimate values due to technological requirements for the production process, technical inaccessibility or economically justified inexpediency, measures are provided to protect against possible overheating or hypothermia, as well as measures to increase or decrease air humidity.

**Justification of the need for humidification of air in work areas.** A healthy atmosphere with an optimal level of humidity is one of the main factors for increasing employee productivity. A comfortable humidity level of 40-60% can be ideal for people to concentrate and feel good. At values below 50%, the mucous membrane begins to dry out, which increases susceptibility to respiratory diseases.

Humidified air binds dust particles much faster than dry air. Reduced dust levels and improved air circulation have a positive effect on breathing problems in allergy or asthma sufferers.

In rooms that require cooling or heating depending on the season, there is a problem with the level of relative humidity and its impact on workers, which requires temperature control. Adiabatic humidification systems provide a sustainable, environmentally friendly solution. If the room requires high heat loads from outside or inside, aerosol droplets in the air extract heat energy and provide energy-efficient cooling. If the relative humidity decreases during an increase in heat load, moisture comes into the air through the same system.

There are main advantages of humidifying air in workplaces:

- reduction in the number of sick leaves due to a healthier indoor atmosphere;
- increasing productivity and improving employee well-being;
- reduction of dust pollution;
- protection against electrostatic discharge;
- high energy efficiency.

Dry air consists of 78% nitrogen, 21% oxygen, and about 1% carbon dioxide, inert and other gases. If there is water vapor in the air, then such air is called humid air. Dry atmospheric air is characterized by the constancy of its composition and can be

considered as a homogeneous gas. The state of a homogeneous gas is usually determined by two parameters, namely pressure and temperature, and at constant pressure – only by temperature.

The content of water vapor in the air is not constant. The main parameters of humid air include its temperature, degree of saturation, moisture content, heat content, density and specific volume. Maximum humidity (dew point) is characterized by the maximum amount of moisture that can be in the air at a certain temperature. Absolute humidity is characterized by the actual amount of moisture that is in the air at a certain temperature. Relative humidity is the ratio of absolute humidity to maximum humidity under given temperature conditions. Relative humidity is considered as a normative indicator when assessing working conditions.

Sources of excess moisture release can be production facilities in which water evaporates (all kinds of bathtubs, washing machines, etc.). Particularly intensive moisture release occurs when water is heated or mechanically stirred. Another source of moisture release is the worker's body. As noted above, the optimal relative humidity is 40–60%, and the amount of moisture released depends on the nature of the work performed and the temperature. In air excessively saturated with water vapor, the evaporation of moisture from the surface of the skin and lungs slows down, which can sharply worsen the health of the worker and reduce his working capacity. As in pure form, steam in the air can be superheated (unsaturated) and saturated.

Considering a typical office, the temperature deviation during the day is 1–2 °C, and the relative humidity is 5%. The necessary air exchange (in accordance with sanitary and hygienic requirements) is carried out by periodic ventilation. Employees most often complain of dry nose and difficulty swallowing, the incidence of workers increases, especially during the heating period. These consequences of poor health are due to the fact that in a heated room, the relative humidity ranges from 10% to 30%, in the evening and morning this indicator decreases even more due to the low outside temperature. Inhaling air with such low relative humidity by a person causes unpleasant dryness of the mucous membranes of the respiratory tract. Health deteriorates if work is associated with constant or frequent conversations. The first alarms, namely, dryness

around the nasopharynx, sometimes with painful irritation, are most often not taken seriously. At low relative humidity, the function of the ciliated epithelium is disrupted: mucus thickens and cannot drain, lingering on the mucous membrane. In addition, the respiratory tract and lungs can remain healthy only if there is a sufficient amount of mucus and its timely removal. Due to this, all pathogenic microorganisms, as well as dust and other dirt remain in the respiratory tract and, under certain conditions, are able to penetrate the mucous membranes of the respiratory tract. As a result of working in such premises, the following diseases occur: inflammation of the paranasal sinuses, inflammation of the respiratory tract, inflammation of the pulmonary alveoli, lung infections [509].

In industrialized countries, respiratory diseases are second only to cardiovascular diseases. Almost 90% of the population suffers from colds at least once a year. A bacterial infection that is not recognized in time causes a deterioration in health for a significant period. If it is possible to maintain a relative humidity of 40–60%, depending on the temperature and working conditions in the room, there is a simultaneous decrease in the number of microbes in the air. Studies have shown that pneumococci die in less than 10 minutes at a humidity of 50%, and at 20% or 80% they can survive for more than two hours. Therefore, the greatest attention should be paid to humidification processes in the winter (heating) period, even at high relative humidity. Because when entering the room, the air does not change its absolute humidity, unlike the relative humidity, which decreases sharply [509].

The studies cited by the authors in the article [510] show that it is temperature, humidity, and indoor air quality that play a dominant role in improving the health and productivity of employees.

The relationship between seasonal variations and viral disease outbreaks has been the subject of much debate. Low temperatures are thought to increase the half-life of the virus, and low relative humidity is thought to negatively affect the processes that lead to viral inactivation. As a result, there is growing interest in how indoor temperature and relative humidity affect the risk of airborne virus transmission. Studies and observational data suggest that high temperatures, as well as relative humidity in

the range of 40–60%, may reduce transmission of the novel coronavirus (COVID-19) [511].

Since people spend a significant amount of time indoors, the quality of the indoor environment affects the cognitive functions of those who are there. and accordingly, their learning. work and productivity. The article [512] studies the influence of indoor air quality, the level of heat load, lighting, noise on attention, perception, memory, and language functions. However, the influence of a particular factor is determined by its compliance with regulatory indicators. Therefore, the influence of these factors on different cognitive functions is quite different.

To investigate the interaction between the cool mist humidification process and the floor heating process, experimental studies were conducted in rooms with temperatures of 21°C, 23°C, 25°C and with set values of relative humidity of 45%, 55%, 65% in the article [513]. The problem of floor overheating must be taken into account when humidifying air at temperatures of 25°C and above. The humidification process makes the air temperature distribution more uniform, but significantly increases energy consumption. The set relative humidity of 45% meets health safety requirements with minimal energy consumption. A relative humidity of 55% can be selected at temperatures below 25°C for better thermal comfort in individual situations where energy consumption is acceptable.

In the article [514], studies were conducted to determine the effectiveness of using humidifiers that increase indoor air humidity to reduce or prevent symptoms of dry eyes, skin, and upper respiratory tract infections at work and in educational institutions.

#### **Justification of the need for humidification of air in residential premises.**

Humidity in residential premises directly affects a person's physical and emotional well-being, as well as their general health. Even minor deviations from the established norm can lead to a number of unpleasant diseases.

To create a healthy and comfortable microclimate in an apartment or house, it is important to first determine the humidity level in the rooms and, if necessary, promptly take measures to normalize it.

For a person to feel good. the humidity in living spaces should be between 30% and 45%. However. these figures can vary to a greater or lesser extent, depending on the purpose of the room.

Optimal parameters of living spaces:

- for a children's room – from 45% to 60%;
- for the library and office – from 30% to 40%;
- for the bedroom – from 40% to 50%;
- for the kitchen, bathroom, living room – from 45% to 60%.

It is quite difficult to independently maintain the required air humidity levels, as they strongly depend on external factors: the season, weather conditions, degree of heating, intensity of household chores, number of people in the room, number of indoor plants, etc.

Therefore, to maintain optimal living conditions indoors, household dehumidifiers are installed in a house or apartment. If there is not enough liquid in the air, special humidifiers are used; the devices operate in automatic mode, continuously maintaining humidity within normal limits.

The main physical factors that affect the safety of workers include: temperature, humidity, air velocity. The task of assessing the levels of harmful factors in working areas at industrial enterprises is urgent.

One of the important tasks is to develop a comprehensive methodology that allows predicting the wind regime, humidity and temperature in working areas in the presence of the use of an artificial air humidifier, taking into account the droplet evaporation process.

To implement the task, there are various methods.

**Methods of modeling and evaluation of air environment parameters in working areas.** To solve such practical problems as assessing the comfort of the microclimate or determining the required power of the system providing the microclimate, it is necessary to determine the distribution of microclimate parameters in the working area and their change over time. In this case, modeling of processes is

used or their reproduction by methods that adequately reflect the conditions of the processes in reality.

The main goals of mathematical modeling are:

- research, for in-depth study of the processes of formation or development of new technologies for ensuring optimal microclimate conditions;
- calculation, for determining the parameters of the installation of a system for ensuring optimal microclimate conditions in design conditions and the operating mode of the system in operational conditions.

Three types of modeling are usually used to simulate the processes of microclimate formation:

- mathematical modeling based on solving a system of equations in differential or algebraic form, describing the air, moisture and gas regime of the working area;
- physical modeling in natural conditions or on models geometrically similar to a natural object, to which physical processes are transferred using scale relationships;
- analog modeling – a type of physical, when real processes are replaced by others that have a formally similar mathematical description.

Mathematical modeling represents physical processes in a simplified idealized form. The reality and reliability of physical processes is ensured by physical modeling.

Physical modeling is carried out in natural conditions and on geometrically similar models. Physical modeling is performed using trays, channels, wind tunnels and other experimental installations (Fig. 5). However, there are a number of difficulties that complicate the unambiguous transfer of the results of physical modeling to real objects:

- correspondence of scales;
- agreement of criterion numbers (for example,  $Re$ ,  $Fr$ );
- preservation of the integrity of the studied samples, etc.

Full-scale studies are carried out on operating objects. One-time surveys and long-term observations (monitoring) of the object are possible.

However, in natural conditions it is difficult to establish the regularities of certain processes due to the large number of random obstacles. In this case, it is important to

ensure long-term observation and study of the object (using modern measuring and computing devices).

In addition to expensive natural surveys, it is possible to conduct research in laboratory conditions on models similar to the natural object. The laboratory-model method has a number of advantages and disadvantages.

Advantages:

- ability to study objects that have not yet been created in nature;
- ability to systematically study the influence of any factor from the entire set of factors;
- ability to study rapidly changing phenomena;

Disadvantages:

- results of modeling can only be systematically extended to similar phenomena;
- significant time spent on making models and conducting experiments;
- large material costs for expensive equipment and laboratory equipment.



**Figure 5.** Experimental studies [515-516]

Mathematical modeling is based on solving the system of equations of motion, heat and mass balance of gas impurities in differential form in partial derivatives. The system of equations is supplemented by boundary conditions, which include boundary and initial conditions. The solution of the system allows you to determine the distribution of microclimate parameters and their change in time. These include: analytical models and numerical models.

Simple analytical deterministic models are based on empirical data and balance relations for a given air environment. With the help of such models, you can obtain approximate estimates of the main indicators of the state of the environment for large territories (city, region, etc.). Statistical models are built based on air (water) pollution observation data and monitoring data with subsequent analysis of time series. Such models are unsuitable for long-term forecasts, but are convenient to use, since they have a low development cost, and they are also used mainly for processing monitoring data. During operational forecasts in the environment, especially in the absence of detailed information about the structure of flows and the composition of substances, it is advisable to use models based on analytical solutions of partial differential equations. Most of such solutions were obtained for simple flow schemes in the case of constant or specially specified environmental parameters.

Despite the above limitations, analytical models, due to their relatively simple implementation, are indispensable in the analysis of the basic laws of the process under study.

Analytical methods include: the Gaussian and Lagrange methods, and their modifications. The Gaussian analytical method and its modifications solve simplified equations of impurity transport taking into account a point constant emission source and a point instantaneous emission source. These methods do not take into account the change in the wind speed profile with height, the dispersion coefficients are determined empirically, but not for all regions.

The Lagrange analytical method and its various modifications study the movement of particles according to their trajectories; they are used for large-scale transports, namely "ARCO", "MOE", "NAME", "QWIC".

In the process of solving practical problems in the field of environmental protection and labor protection, numerical algorithms for solving partial differential equations have become the most widely used. As a rule, they are based on finite difference or finite element methods. These algorithms allow taking into account in detail the complex structure of flows and the shape of the boundaries of the area, relief



features, etc. At the same time, they require the development of special software, justification of the accuracy of convergence.

Numerical methods are the most effective tool for solving forecasting problems related to pollution of working areas in open areas. Among them are: URB – 3D Wind Model, CFD (CWE) – Computational Fluid Dynamics Model. These models allow you to quickly calculate the state of the air environment parameters in working areas and in the surrounding area, taking into account the main physical factors affecting them.

CFD models are primarily designed to simulate wind flow around objects. In the context of microscale air quality, these objects usually consist of buildings, trees, cars, screens, etc (Fig. 6).

There are three main steps in CFD air quality simulation: creating a two-dimensional or three-dimensional geometry; modeling wind flow; modeling the dynamics of changes in the factor variable). CFD models are characterized by a high level of detail: the step in the planar or spatial coordinate is about 1 m or even less. The modeled area is usually limited to a region up to 1 km long.

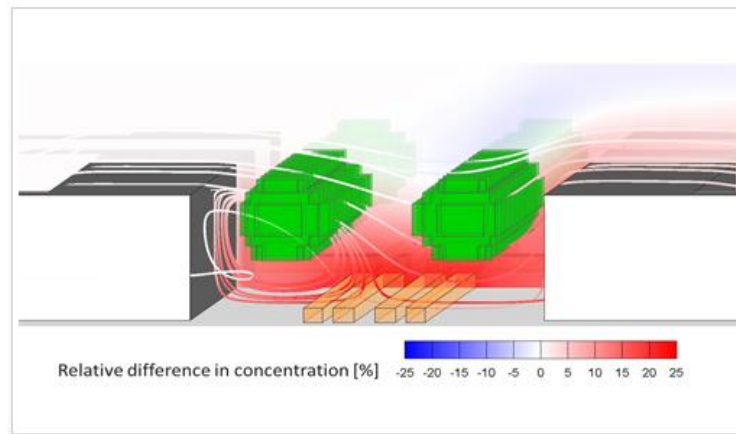
It should be emphasized that abroad, the Navier-Stokes equations are used for CWE wind flow modeling problems - one of the fundamental models of aerodynamics. Numerical models make it possible to reproduce the process of air pollution close to a physical experiment.

Numerical models have the following advantages:

- high accuracy of calculations;
- taking into account turbulence conditions;
- taking into account the underlying surface;
- taking into account the unevenness of the velocity field.

Numerical models have the disadvantages:

- high cost of the license package;
- requires highly qualified workers;
- inability to take into account all boundary conditions.



**Figure 6.** CFD modeling [516]

Therefore, from a practical point of view, it is very important to develop calculation methods that meet the requirements:

- ease of practical application;
- small base of initial data;
- speed of calculation;
- ease of processing and interpretation of quantitative results.

**The influence of the main indicators of the microclimate of the working area air on workers in various industries.** The health of the working population is influenced not only by the biological properties of the organism, but also by social factors that are formed under the influence of the working conditions of this production, economic conditions, the way and quality of life of workers.

According to statistics, in Ukraine, every fourth worker works in conditions that do not meet sanitary and hygienic standards in terms of dust content, chemical impurities in the air of the working area, vibration, noise, infra- and ultrasound, ionizing and non-ionizing radiation, difficulty and intensity of work. The most dangerous are working conditions in the coal industry – 74.1% and in metallurgy – 59.6%.

At enterprises, the well-being and health of workers depends on the microclimate of production premises. The main indicators of the microclimate of the working area air include: *temperature, relative humidity, air velocity*. The parameters of the microclimate and the state of the human body are also affected by the intensity of

thermal radiation of various heated surfaces, the temperature of which may exceed the temperature in the production room.

The production microclimate is variable, has an uneven distribution horizontally and vertically. The values of temperature, humidity, air velocity, radiation intensity depend on the characteristics of production technologies, climatic conditions of the area, building structures, and the organization of air exchange with the external environment.

One of the most developed industries in Ukraine, which accounts for more than a quarter of all industrial production, is *ferrous metallurgy*. In metallurgical production, the replacement of old technological equipment and the introduction of new technologies is extremely slow. This leads to a significant impact of harmful factors of the production environment of metallurgical enterprises on the health of workers, which leads to an increase in occupational health risks. Working conditions in modern metallurgical plants are determined by both technological processes and the features of the equipment of the workshops of these enterprises. With an increase in the volume of steelmaking furnaces, the volume of hot sinter, heated metal structures, and powerful heat sources, the heat input into the premises of the workshops also increases. For premises with excess heat, a *high air temperature* exceeding the maximum permissible levels and *low relative humidity* in the warm season are characteristic. The *level of humidity is also affected by the dustiness* of the air in metallurgical workshops, which occurs at different stages of the technological process [517]. Overheating can be a consequence of the influence of high temperature of the production environment in “hot” workshops, such as blast furnaces, open-hearth furnaces, and rolling mills. About 30-40% of the heat required by the production technology enters the air of the production premises. This problem is especially relevant in the summer, when the air temperature in the working area can reach 30-40°C and more. Some short-term labor operations are performed at air temperatures of 60-90°C and above. Overheating of the body is considered a state of thermal balance disturbance with increased heat production and difficulty in its dissipation, which is accompanied by an increase in the amount of thermal energy in the body.

In the hot season, due to intense solar radiation and high ambient temperature, the air in closed production spaces with metal frames (railway cars, locomotives, car interiors, tractors, combines) heats up especially quickly. In this case, the outer metal shell can heat up to 45–55°C.

High temperature, as a degree of air heating, is observed: *in foundries, thermal, blacksmith shops, in a number of textile, rubber, food, chemical, agricultural industries, production of cement, slate, glass, brick and other building materials* and is most often caused by the operation of the main technological equipment.

Overheating is exacerbated by heavy physical labor, high humidity, and still air.

Workers' well-being deteriorates when working in tight or water vapor-impermeable clothing. The danger of overheating of the body occurs when exposed to high temperatures and thermal radiation, especially in the presence of factors that hinder heat exchange with the external environment. The complicated process of heat exchange, namely the transfer of heat from the body to the environment, is characterized by the accumulation of heat in the human body. This is accompanied by the tension of the mechanisms of physical thermoregulation: the expansion of blood vessels of the skin, the acceleration of blood flow through the vessels and increased sweating.

When the air temperature rises to 33°C, heat transfer by conduction and radiation becomes ineffective, it occurs only by evaporation, and with increased air humidity this path of heat transfer also becomes difficult. Under such circumstances, the balance between the formation of heat in the body and its transfer to the external environment is disturbed, which causes heat retention and overheating. The period of overheating, characterized by the preservation of normal body temperature, is called *the compensation stage*. Overexertion of thermoregulation leads to its exhaustion, and an increase in body temperature indicates the onset of the second period of overheating - *the decompensation stage*. An increase in body temperature is accompanied by a sharp disruption of the central nervous system, respiratory and circulatory systems, and increased metabolism. A further increase in body temperature and overexertion of the nerve centers can cause their exhaustion with significant disorders of the respiratory

and cardiovascular systems and a decrease in blood pressure. Hypoxia develops. Profuse sweating also has negative consequences – *dehydration, impaired electrolyte metabolism with the loss of cations, anions, and some organic substances important for the body. Thickening of the blood and an increase in its viscosity* create an additional burden on the circulatory system and contribute to the development of heart failure. Acute diseases can occur as a result of overheating – *hyperthermia, convulsions, and heat stroke*. Prolonged exposure to high temperatures leads to *chronic overheating*.

Overheating of workers during the performance of their labor duties is especially dangerous. After all, due to the need to comply with regulated technological processes and regimes, the employee cannot always respond in time to the first signs of overheating. In addition, in hot weather, the negative impact on the employee of other harmful production factors increases, especially when working in confined spaces, with reduced air movement and increased humidity.

Low temperature is characteristic of work performed outdoors: *logging, construction, road, peat work. As well as work in unheated rooms in the cold season, when servicing artificially cooled rooms, in particular, cold storage rooms, in warehouses, in the shipbuilding industry, in elevators.*

High levels of air humidity are characteristic of *pickling, galvanic, fish processing, dyeing shops, leather, paper, construction and other industries*. Technological processes associated with increased humidity take place at *food industry enterprises, namely at dairy and meat processing plants, at leather processing plants, in galvanic and pickling departments in mechanical engineering, in spinning and weaving workshops*, increased humidity is often created artificially, in order to implement the tasks of the technological process.

Air mobility is created as a result of temperature differences in adjacent areas of the room, the penetration of cold air flows from the outside into the room, during the operation of ventilation systems, etc. Increased air velocity is observed during the operation of special air conditioning and ventilation units [517].

Microclimate parameters, such as temperature, relative humidity, air velocity, and the level of thermal radiation, are important factors of the production environment, on which working conditions, and therefore the health of workers, depend to a large extent. Therefore, the organization of work with optimal parameters of the microclimate of the production environment remains not only one of the main tasks, but also a labor problem.

The results of the research indicate that in production conditions all microclimate parameters affect a person simultaneously. Therefore, it is important to identify their total impact on the worker. To measure microclimate parameters, various devices are used that allow conducting research locally, at a specific point in space. One of the ways to predict and assess the field of temperature, humidity, and air velocity in working areas is to develop a mathematical method based on the equations of transport and evaporation of a droplet. The solution of these equations is based on the numerical method of finite differences. Software based on the developed method allows conducting a large number of computational experiments for preliminary assessment of microclimate parameters in working areas in open areas.

**Prediction of microclimate parameters in working areas in an open area when using a humidifier.** Air humidity is one of the components of ensuring a comfortable microclimate. All humidifiers are divided into household and industrial. At the same time, if domestic ones are necessary to maintain comfortable conditions for human well-being, then the use of industrial humidifiers significantly affects the technological process and the quality of finished products. Figure 5 shows the use of humidifiers for the comfortable stay of trade workers in open areas and consumers [518].



**Figure 7.** Application of humidifiers in working areas in the open area

Solving the problem of forecasting microclimate parameters in the working area when using a humidifier is divided into two main stages. At the first stage, the equations simulating the dispersion of water, water vapor, temperature change under the influence of wind and atmospheric diffusion (2–3) are solved [518].

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial vC}{\partial y} = \mu\Delta C + \sum_{i=1}^n Q_i \delta(x - x_i) \delta(y - y_i). \quad (2)$$

$$\frac{\partial W}{\partial t} + \frac{\partial uW}{\partial x} + \frac{\partial vW}{\partial y} = \mu\Delta W. \quad (3)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial uT}{\partial x} + \frac{\partial vT}{\partial y} = a\Delta T. \quad (4)$$

where  $C$  – concentration of water droplets in the air;  $u, v$  – components of the wind speed vector;  $\mu = (\mu_x, \mu_y)$  – coefficient of turbulent diffusion;  $x_i, y_i$  – coordinates of the source of water drops;  $\delta(x - x_0) \delta(y - y_0)$  – the Dirac delta function, which simulates the entry of water droplets into the atmosphere. The values of the diffusion coefficients are calculated according to the formulas:  $\mu_x = (0,1 \div 1) \cdot U$ ,  $\mu_y = (0,1 \div 1) \cdot U$ , where  $U$  – wind speed,  $W$  – concentration of water vapor in the air,  $T$  – air temperature,  $\sigma$  takes into account the rate of water evaporation,  $a$  – coefficient of thermal conductivity [518].

The development of the method includes the solution of equations (2)–(4) using the finite-difference method, the numerical integration of equations (2)–(4) is performed on a rectangular difference grid using the difference analog and an implicit five-step difference splitting scheme [516, 518]. The application of this scheme is given for the equation (5)–(10).

The time derivative is approximated by the divided difference "backward":

$$\frac{\partial C}{\partial t} \approx \frac{C_{ij}^{n+1} - C_{ij}^n}{\Delta t}.$$

In convective derivatives. the components of unidirectional transfer are written as:

$$\frac{\partial u C}{\partial x} = \frac{\partial u^+ C}{\partial x} + \frac{\partial u^- C}{\partial x}; \quad \frac{\partial v C}{\partial y} = \frac{\partial v^+ C}{\partial y} + \frac{\partial v^- C}{\partial y}.$$

Taking into account the previous expression, the convective derivatives are approximated by separated differences "against the flow" in the upper time layer:

$$\frac{\partial u^+ C}{\partial x} \approx \frac{u_{i+1,j}^+ C_{i,j}^{n+1} - u_{i,j}^+ C_{i-1,j}^{n+1}}{\Delta x} = L_x^+ C^{n+1},$$

$$\frac{\partial u^- C}{\partial x} \approx \frac{u_{i+1,j}^- C_{i+1,j}^{n+1} - u_{i,j}^- C_{i,j}^{n+1}}{\Delta x} = L_x^- C^{n+1},$$

$$\frac{\partial v^+ C}{\partial y} \approx \frac{v_{i,j+1}^+ C_{i,j}^{n+1} - v_{i,j}^+ C_{i,j-1}^{n+1}}{\Delta y} = L_y^+ C^{n+1},$$

$$\frac{\partial v^- C}{\partial y} \approx \frac{v_{i,j+1}^- C_{i,j+1}^{n+1} - v_{i,j}^- C_{i,j}^{n+1}}{\Delta y} = L_y^- C^{n+1}.$$

The components of the speed  $u$  are determined on the vertical faces of the difference cells, and the components of the speed  $v$  are determined on the horizontal faces. The indexes of these faces correspond to the indexes of cells located to the right or above the corresponding boundary.

Second derivatives are approximated as follows:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \mu_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) \approx \mu_x \frac{C_{i+1,j}^{n+1} - C_{i,j}^{n+1}}{\Delta x^2} - \mu_x \frac{C_{i,j}^{n+1} - C_{i-1,j}^{n+1}}{\Delta x^2} = M_{xx}^- C^{n+1} + M_{xx}^+ C^{n+1};$$

$$\frac{\partial}{\partial y} \left( \mu_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) \approx \mu_y \frac{C_{i,j+1}^{n+1} - C_{i,j}^{n+1}}{\Delta y^2} - \mu_y \frac{C_{i,j}^{n+1} - C_{i,j-1}^{n+1}}{\Delta y^2} = M_{yy}^- C^{n+1} + M_{yy}^+ C^{n+1}.$$

where  $L_x^+$ ,  $L_x^-$ ,  $L_y^+$ ,  $L_y^-$ ,  $M_{xx}^+$ ,  $M_{xx}^-$ ,  $M_{yy}^+$ ,  $M_{yy}^-$  – conventional signs of difference operators. Taking into account the above signs, the difference analog of the transfer equation (2) is written as follows:

$$\frac{C_{i,j}^{n+1} - C_{i,j}^n}{\Delta t} + L_x^+ C^{n+1} + L_x^- C^{n+1} + L_y^+ C^{n+1} + L_y^- C^{n+1} + \sigma C_{ij}^{n+1} =$$



$$= (M_{xx}^+ C^{n+1} + M_{xx}^- C^{n+1} + M_{yy}^+ C^{n+1} + M_{yy}^- C^{n+1}) + q_{ij} \delta_{ij}. \quad (5)$$

where  $Q_i(t)$  – the intensity of the corresponding  $i$ -th source placed in the difference cell « $ij$ »,  $\delta_{ij}$  – number «1» or «0», depending on whether the source of pollution is located in the difference cell « $ij$ » or not,  $q_{ij} = Q_i(t)/(\Delta x \Delta y)$ ,  $\Delta x \Delta y$  – the area of this cell.

The difference equation (5) is split into five difference equations so that at each step only one direction of disturbance transfer is taken into account, which is determined by the sign of the convective derivative. In this case. the differential equations take the following form:

– at the first step of splitting  $k = \frac{1}{4}$ ,

$$\begin{aligned} \frac{C_{ij}^{n+k} - C_{ij}^n}{\Delta t} + \frac{1}{2} (L_x^+ C^k + L_y^+ C^k) = \\ = \frac{1}{4} (M_{xx}^+ C^k + M_{xx}^- C^n + M_{yy}^+ C^k + M_{yy}^- C^n); \end{aligned} \quad (6)$$

– at the second step of splitting  $k = n + \frac{1}{2}$ .  $c = n + \frac{1}{4}$ ,

$$\begin{aligned} \frac{C_{ij}^k - C_{ij}^c}{\Delta t} + \frac{1}{2} (L_x^- C^k + L_y^- C^k) = \\ = \frac{1}{4} (M_{xx}^- C^k + M_{xx}^+ C^c + M_{yy}^- C^k + M_{yy}^+ C^c); \end{aligned} \quad (7)$$

– at the third step of splitting  $k = n + \frac{3}{4}$ .  $c = n + \frac{1}{2}$ ,

$$\begin{aligned} \frac{C_{ij}^k - C_{ij}^c}{\Delta t} + \frac{1}{2} (L_x^+ C^k + L_y^- C^k) = \\ = \frac{1}{4} (M_{xx}^- C^c + M_{xx}^+ C^k + M_{yy}^- C^k + M_{yy}^+ C^c); \end{aligned} \quad (8)$$

– at the fourth step of splitting  $k = n + 1$ .  $c = n + \frac{3}{4}$ ,

$$\begin{aligned} \frac{C_{ij}^k - C_{ij}^c}{\Delta t} + \frac{1}{2}(L_x^- C^k + L_y^+ C^k) = \\ = \frac{1}{4}(M_{xx}^- C^k + M_{xx}^+ C^c + M_{yy}^- C^c + M_{yy}^+ C^k); \end{aligned} \quad (9)$$

– at the fifth step of splitting. we take into account the source of contamination:

$$\frac{C_{ij}^{n+1} - C_{ij}^n}{\Delta t} = \frac{\sum_{i=1}^n Q_i(t^{n+1/2})\delta(x - x_i)\delta(y - y_i)}{\Delta x \Delta y}. \quad (10)$$

At the second stage of the calculation, the process of evaporation of water droplets is simulated. For this, equation (11) [518] is used:

$$\frac{\partial C}{\Delta t} = -\sigma \cdot (C - C_s), \quad (11)$$

where  $C_s$  – the concentration of saturated vapor in a specific control volume at a specific air temperature in that volume.

The change in water concentration  $C$  in each control volume is modeled by the first-order equation (12) [518]:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -\sigma \cdot C, \quad (12)$$

where  $\sigma$  takes into account the rate of evaporation of water droplets. The analytical solution of this equation can be written in the form  $C = C_0 \cdot e^{-\sigma t}$ , where  $C_0$  – the initial value of the water concentration in the control volume. Using this dependence, you can roughly estimate the value of the coefficient  $\sigma$  based on the condition  $e^{-10} \approx 0$ , then  $\sigma t = 10$ ,  $t$  – the evaporation time. which is assumed to be equal  $10^{-2}$  s for water drops  $d = 1$  mkm, which corresponds to such a state of water as fog. From where we will get the approximate value of the coefficient  $\sigma$ .

At the second stage, the air temperature is recalculated in each difference cell due to the evaporation of water droplets. The following approach is used for express calculation of this process.

Let the heat that was used to evaporate water of elementary mass  $dm$ , is  $Q_w = r \cdot dm$ ,  $r = 2,3 \cdot 10^6$  J/kg. This heat will come from the environment, that is, from the air, the value of this heat is calculated as follows [518]:

$$Q_{air} = m_{cell} \cdot c \cdot T^n.$$

where  $m_{cell}$  – mass of air in the cell,  $c$  – specific heat capacity,  $T^n$  – the current moment in time.

The evaporation process leads to a change in the amount of heat in the control volume of air [518]:

$$Q_{air} - Q_w = m_{cell} \cdot c_{air} \cdot T^n - r \cdot dm.$$

The mass and volume of air in the cell are [518]:

$$m_{cell} = \rho_{air} \cdot W_{cell},$$

$$W_{cell} = h_x \cdot h_y = 1.$$

As a result, the ambient temperature changes to  $T^{n+1}$ , and the amount of heat changes in the cell [518]:

$$m_{cell} \cdot c_{air} \cdot T^{n+1} = m_{cell} \cdot c_{air} \cdot T^n - r \cdot dm.$$

From the last ratio. the temperature at the new time step  $n+1$  is calculated according to the formula [518]:

$$T^{n+1} = T^n - \frac{r \cdot dm}{m_{cell} \cdot c_{air}}. \quad (13)$$

When calculating. the value of the dew point temperature is taken into account in each control volume, which is determined with the help of the device according to the values of the ambient temperature and humidity.

For simultaneous assessment of air temperature and humidity, it is advisable to use the effective air temperature, which is calculated according to the formula [518]:

$$T_{app} = -2.653 + 0,994 \cdot T_{air} + 0.0153 \cdot T_{dewpt}^2,$$

where  $T_{app}$  – effective temperature,  $T_{air}$  – air temperature,  $T_{dewpt}$  – dew point temperature.

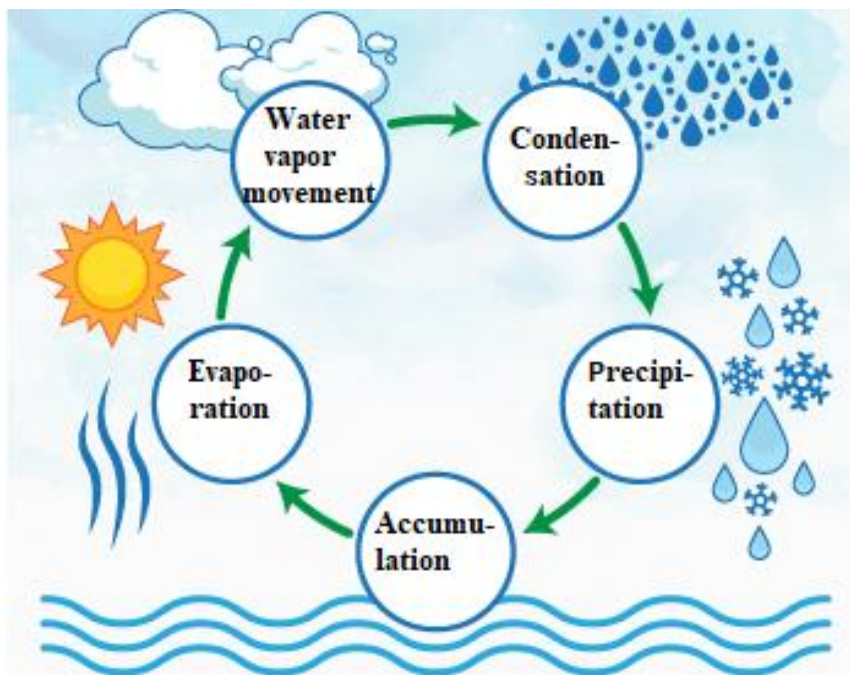
It is calculated based on information about relative humidity according to the formula [518]:

$$T_{dewpt} = \frac{b \cdot \gamma(T, RH)}{a - \gamma(T, RH)},$$

where  $\gamma(T, RH)$  is calculated by the formula [518].

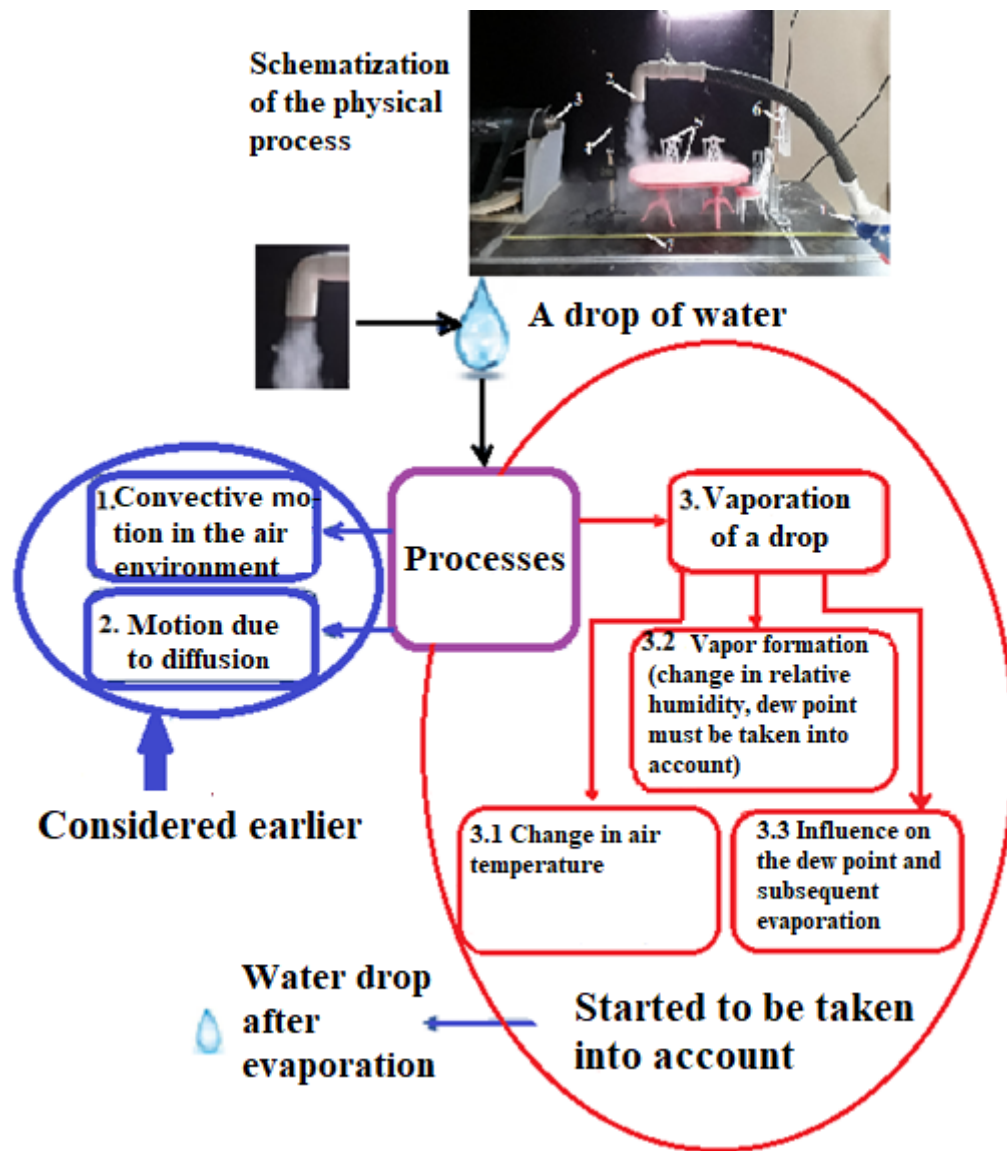
$$\gamma(T, RH) = \frac{a \cdot T}{b + T} + \ln(RH / 100),$$

where  $T$  – air temperature,  $RH$  – relative humidity,  $a$ ,  $b$  – constants,  $a = 17.271$ ,  $b = 237.7$ . The large water cycle in nature is presented in the figure 8.



**Figure 8.** The large water cycle in nature

Schematization of the droplet evaporation process is presented in figure 9.

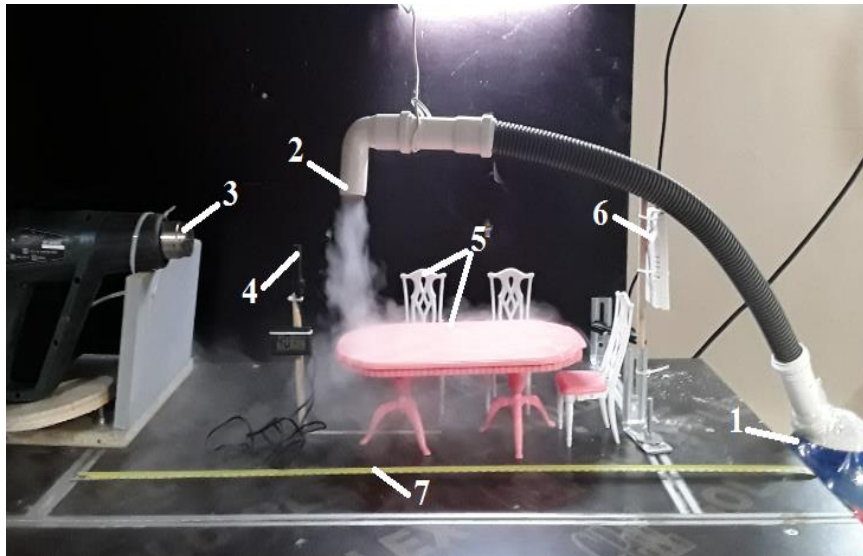


**Figure 9.** Schematization of the physical process in the calculation method of humidification

At the first stage of the research, an experiment was conducted to simulate the working area on the street (in an outdoor cafe). Furniture elements were presented on a scale of 1:10 (Fig. 10). modeling was carried out according to the Reynolds number. The supply of finely dispersed water was carried out at the top of the working area, as it happens in a cafe.

The experiment used a Supra HDS-104 ultrasonic air humidifier with volumetric flow rate  $Q=300$  ml/h. Evaporation occurs due to high-frequency (ultrasonic) vibrations of a special membrane, which forcibly turns water into steam with the temperature of cold water, so this type of evaporation is often called "cold steam". The principle of action is that water from the tank is fed to a vibrating plate with a high

(ultrasonic) frequency. where the water is broken into a finely dispersed water suspension. The air flow created by the fan supplies the water suspension, where it turns into a vapor state [518].



**Figure 10.** Scheme of the experimental installation:  $V=0$  m/s,  $Q=0.832$  ml/s:

1 – humidifier, 2 – steam supply nozzle, 3 – pressure fan, 4, 6 – devices for measuring humidity, 5 – furniture and working area.

7 – device for measuring distance (first script)

The vapor that is released looks very much like fog. The moisture obtained due to the operation of the membrane is captured by the air flow from the fan built into the humidifier and enters the air flow through a special spray nozzle. The atomizer is designed in such a way to deliver the aerosol as far as possible from the humidifier itself.

Figure 8 shows the experimental installation, which consisted of a Supra HDS-104 air humidifier with volume flow  $Q=300$  ml/h, from which steam was supplied through an auxiliary nozzle at a height of  $H=25$  cm from the surface of the installation. At the initial moment, the pressure fan does not work, steam is supplied through hole  $d=3$  cm with constant consumption  $Q=0.832$  ml/s. The Termo Hygrometer DC105 device was used to measure humidity. Humidity measurements were made at a height of 17 cm and at different distances from the emission source. The air flow was created by a channel fan Domovent 125 VKO 188 m<sup>3</sup>/h, the speed of the air flow was measured

using an anemometer – PM 6252B Digital Anemometer. The speed of the air flow was  $V=1.35 - 1.48$  m/s,  $T=21^{\circ}\text{C}$ . The length of the table  $l=0.29$  m was chosen as a characteristic size, the air viscosity was  $\nu=15.04 \cdot 10^{-6}$  m<sup>2</sup>/s. the Reynolds number was used as a similarity criterion, which was equal to  $\text{Re} = \frac{V \cdot l}{\nu} = 0.3 \cdot 10^5$ .

The work considered two scenarios of supplying the volumetric second flow rate of steam. In the first scenario – volumetric second consumption  $Q=0.832$  ml/s, in the second scenario – volumetric second consumption  $Q=1.167$  ml/s. Humidity measurements were carried out at different distances from the steam supply source. At the same time initial data were entered into the numerical calculation method: volumetric second consumption  $Q=1.167$  ml/s, velocity of the incoming flow  $V=1.35 - 1.48$  m/s and other parameters. The results of experimental measurements and calculated data obtained using the developed method are shown in table 1-2.

**Table 1.**

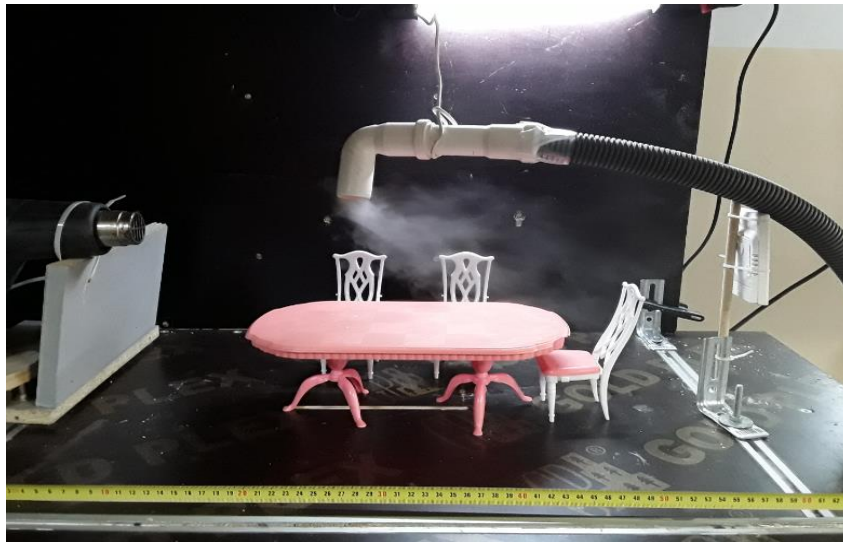
Humidity at different distances from the emission source  $Q=0.832$  ml/s  
(first scenario)

Distance, cm	Humidity, % (experiment)	Humidity, % (calculation by method)	Relative deviation of experimental data from numerical data, %
5	91.5–93.5	90.2	1.3–3.7
10	82.7–87.3	81.7	1.2–6.9
15	76.4–79.2	75.9	0.7–4.3
20	63.6–67.5	62.8	1.3–7.5
25	51.2–57.4	50.6	1.2–9.5
30	44.5–46.1	43.3	2.8–6.5
35	40.5–43.3	40.1	0.9–7.9
40	38.4–39.7	37.5	2.4–5.9
45	34.5–36.1	34.1	1.2–5.8

From Table 1 it can be seen that the moisture values calculated by the developed numerical method are lower than those obtained in the experiment, which is due to the

schematic viscosity. The relative deviation of the experimental data from the numerical ones on average varies in the range of 1.4% – 6.4%.

Figure 11 shows the formation of the fog field corresponding to the first scenario of the power of the vapor emission source  $Q=0.832$  ml/s at air flow speed  $V=1.35 – 1.48$  m/s. Finely dispersed water droplets are carried away by the air flow in the upper part of the working zone [518].



**Figure 11.** Fog field:  $V=1.35 – 1.48$  m/s,  $Q=0.832$  ml/s (first scenario)

If we compare Figure 10 and Figure 11, we can see that under the action of the wind flow, which moves at a speed of  $V=1.35 – 1.48$  m/s, the humidity field shifts along the direction of the air flow, and due to diffusion processes, its humidity level decreases.

Next the results of research for the second scenario, when the power of the emission source is increased are given to  $Q=1.167$  ml/s. Figure 12 – there is no air flow, that is  $V = 0$  m/s. Figure 13 – air flow speed  $V=1.35 – 1.48$  m/s.

Table 2 shows the results of numerical and experimental data with increased emission of the steam supply source  $Q=1.167$  ml/s at an air flow velocity  $V=1.35 – 1.48$  m/s.

Increasing the emission of the steam supply source in the second scenario of the experiment by 40% leads to an increase in humidity levels at different distances from the source on average from the range of 6.6% – 18.8%. This confirms that under the



influence of diffusion processes in the air flow, a rapid dispersion of the humidity field occurs.

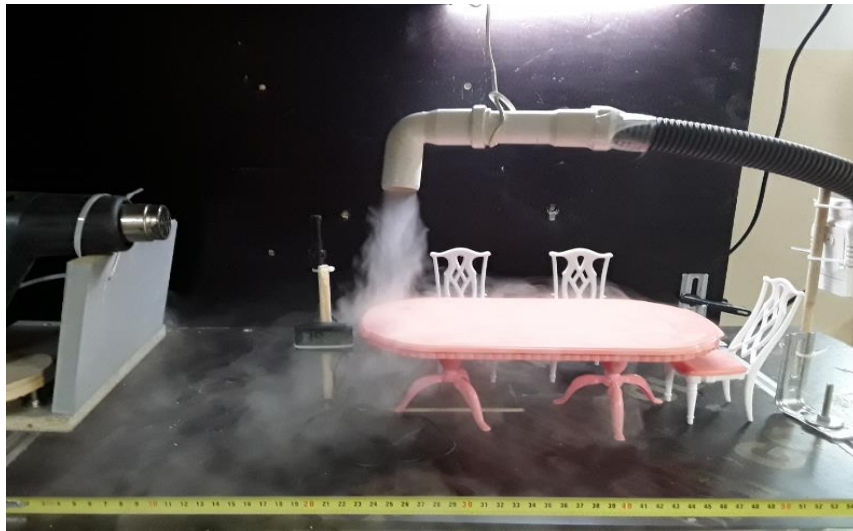
**Table 2.**

Humidity at different distances from the emission source  $Q=1.167$  ml/s  
(second scenario)

Distance, cm	Humidity, % (experiment)	Humidity, % (calculation by method)	Relative deviation of experimental data from numerical data, %
5	97.4–99.3	96.1	1.4–3.3
10	88.6–93.4	87.9	0.8–6.3
15	82.5–85.7	82.3	0.2–4.1
20	69.6–73.8	68.5	1.6–7.7
25	57.2–63.4	57.1	0.2–9.7
30	50.5–52.1	50.3	0.4–3.6
35	46.5–49.4	45.9	1.3–7.6
40	44.4–45.9	43.7	1.6–5.1
45	40.6–42.5	40.5	0.2–4.9

Also from Table 2 it can be seen that the humidity values calculated by the developed numerical method are also lower than those obtained in the experiment, which is due to the scheme viscosity. The relative deviation of the experimental data from the numerical ones on average varies in the range of 0.9% – 5.8%.

Thus, the relative deviation of the experimental data from the numerical ones differs little for the two experimental scenarios, on average for both experiments it varies from 1% to 6%. This indicates the stability of the calculated numerical model, and minor differences are likely related to the experimental conditions, which cannot be reproduced unambiguously, since they depend on the parameters of the air environment.

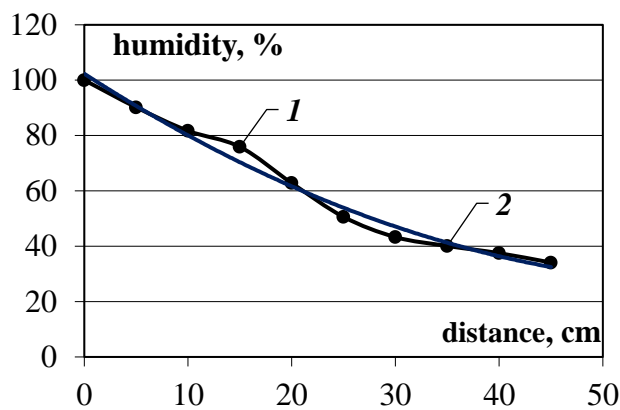


**Figure 12.** Fog field:  $V = 0$  m/s,  $Q=1.167$  ml/s (first scenario)



**Figure 13.** Fog field:  $V=1.35 - 1.48$  m/s.  $Q=1.167$  ml/s (second scenario)

Figure 14 shows the change in humidity at a height of 17 cm and at different distances from the emission source. Air humidity decreases with distance from the source of fog emission.



**Figure 14.** Changes in humidity at a distance from the emission source [518]:

*1* – calculated dependence, *2* – trend line

The dynamics of changes in humidity levels with distance from the emission source can be described by a second-order polynomial dependence:

$$C(x) = a_2 \cdot x^2 + a_1 \cdot x + a_0. \quad (14)$$

where  $x$  – відстань від джерела емісії вологи,  $a_0 = 102.3$ ,  $a_1 = -2.4174$ ,  $a_2 = 0.0192$ .  
Достовірність апроксимації  $R=0.9863$ .

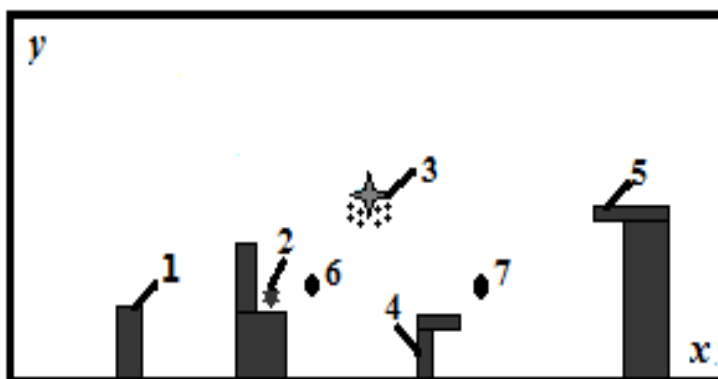
At the second stage of the research, a computational experiment was conducted based on the developed method. On the territory of the "Southern Machine-Building Plant" in the summer period, an open cafe for employees of the enterprise functions (Fig. 15, mark 2).



**Figure 15.** The territory of the rest area of the workers of the "Southern Machine-Building Plant" (Google Earth Image, 2024): *1* – summer cafe, *2* – foundry [518]

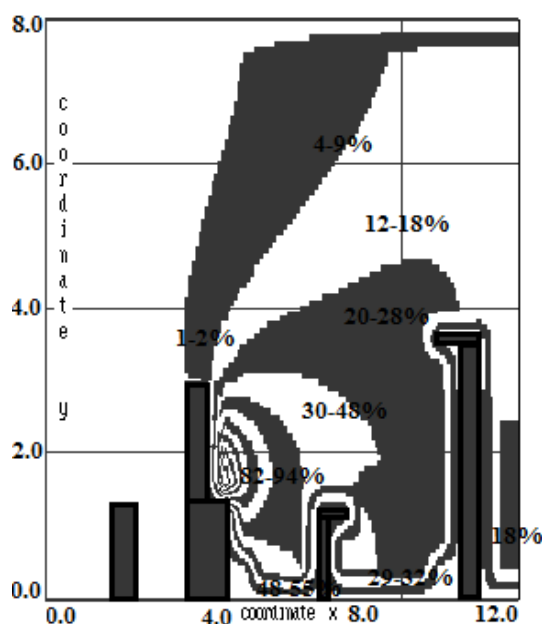
Next to the territory of the summer cafe is a foundry. The recreation area is designed for 12 people. The workshop employs welders, crane operators and metallurgists.

Figure 16 shows the scheme of the calculation area corresponding to the rest area (Figure 15), when the source of heat emission is specified – the place of cooking (stove)  $T=200\text{ }^{\circ}\text{C}$ , the source of moisture emission is an artificial humidifier  $Q=100\text{ g/m}^3$ , the location is specified the employee’s workplace.

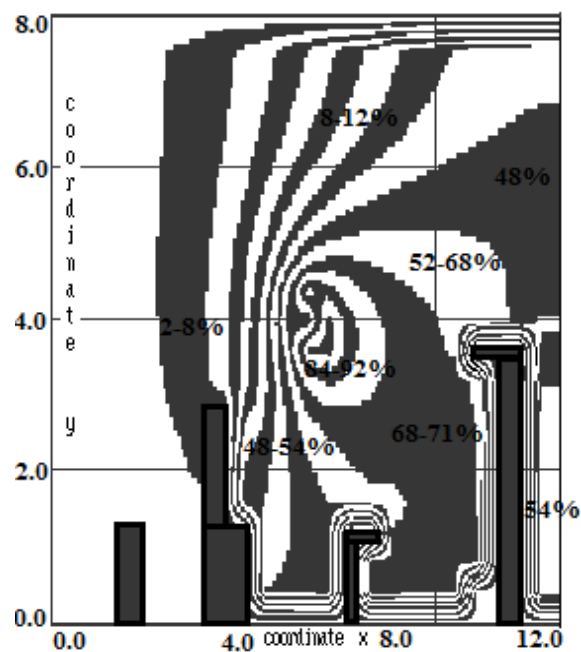


**Figure 16.** Calculation area: 1 – barrier, 2 – heat source (complex for preparing coffee and hot dishes), 3 – source of humidification, 4 – workplace, 5 – open cafe (canopy for visitors), 6, 7 – observation points [518]

Figure 17–18 shows the distribution of the temperature field (isotherm) and the concentration field of water droplets in the cross-section  $y=8\text{ m}$ .



**Figure 17.** Temperature field distribution [518]



**Figure 18.** Distribution of the humidity field [518]

The value of humidity depending on the temperature, which are given in the Table 3 were calculated on the section located between points 6 and 7 (Fig. 16)

**Table 3.**

Value of humidity versus temperature

Distance, cm	Humidity, % (experiment)	Humidity, % (numerically)	Humidity, g/m <sup>3</sup> (numerically)
4.5	42.0	85.0	52.4
5.0	37.8	76.5	47.2
5.5	34.4	69.5	42.9
6.0	31.5	63.8	39.3
6.5	29.1	58.8	36.3
7.0	27.0	54.6	33.7
7.5	25.2	51.0	31.4
8.0	23.6	47.8	29.5
8.5	22.2	45.0	27.7
9.0	21.0	42.5	26.2
9.5	19.9	40.3	24.8
10.0	18.9	38.3	23.6

The optimal and permissible standards of temperature, relative humidity and air movement speed in the working area of industrial premises, depending on the time of

year and the category of performed work (Ia, Ib, IIa, IIb, III) are given in the National Standard of Ukraine.

The working area is considered to be a space limited to a height of 2 m above the level of the floor or platform, where there are places of permanent or temporary stay of employees. The cold period of the year is characterized by an average daily outdoor temperature of  $+10^{\circ}\text{C}$  and below, the warm period is characterized by a temperature above  $+10^{\circ}\text{C}$ .

As the degree of work difficulty increases, the norms of optimal and permissible air temperature at permanent and non-permanent workplaces in cold and warm periods of the year decrease, and the normed values of air movement speed in these conditions, on the contrary, increase. This is so because the increase in physical stress and heat release require the intensification of heat exchange processes.

As an example, the following data from National Standard of Ukraine can be given. The optimal air temperature in the warm period of the year during light work of category Ia is  $22\text{--}24^{\circ}\text{C}$ , heavy work (category III) is  $16\text{--}18^{\circ}\text{C}$ . The permissible air temperature at permanent workplaces under these conditions during the performance of the specified works is  $21\text{--}25^{\circ}\text{C}$  and  $13\text{--}19^{\circ}\text{C}$  respectively.

If during the performance of light work of category Ia, the optimal and permissible speed of air movement is taken to be no more than 0.1 m/s, then during the performance of heavy work, the optimal speed of air movement is set to no more than 0.3 m/s and permissible – no more than 0.5 m/s.

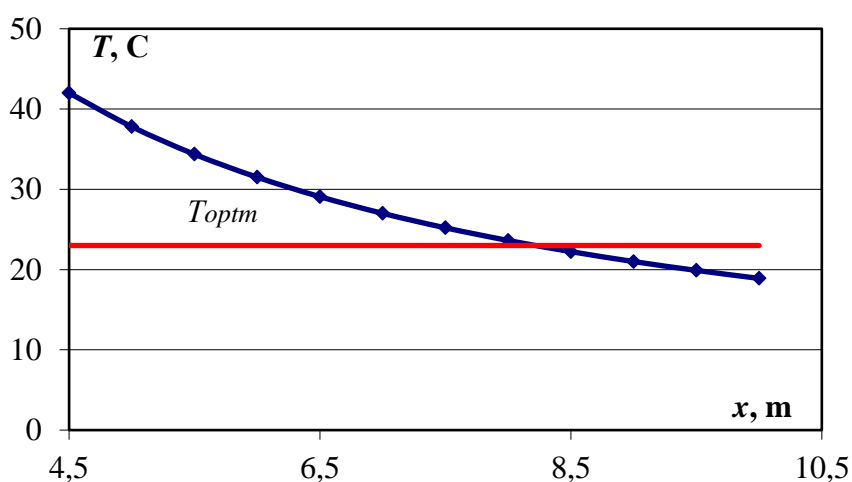
In the warm period of the year, the optimal and permissible standards of temperature and air movement speed are somewhat higher than in the cold period. An increase in air temperature norms in the warm period of the year is compensated by an increase in the speed of its movement. So, if during the performance of light work of category Ib in the cold period of the year, the optimal speed of its movement is no more than 0.1 m/s, then during the performance of the same work in the warm period of the year, the optimal speed is no more than 0.2 m/s.

The minimum permissible air temperature in the cold period of the year during heavy work at permanent and non-permanent workplaces is  $+12^{\circ}\text{C}$  and  $+13^{\circ}\text{C}$ .

respectively. The maximum permissible temperature is set for the warm period of the year during light work of category Ia:  $+28^{\circ}\text{C}$  – at permanent workplaces,  $+30^{\circ}\text{C}$  – at non-permanent workplaces. The minimum rate of air movement speed is  $0.1\text{ m/s}$ , the maximum allowable is  $0.2\text{--}0.6\text{ m/s}$  (during heavy work in the warm period of the year).

Both in the cold and in the warm period of the year, relative air humidity in the range of  $40\text{--}60\%$  is considered optimal. In the cold period of the year, the relative humidity of the air at permanent workplaces should not exceed  $75\%$ . In the warm period of the year, the permissible value of relative air humidity depends on the category of work performed. Thus, during light work of category Ia, the permissible relative humidity of air with a temperature of  $28^{\circ}\text{C}$  is  $55\%$  during heavy work it is  $75\%$  if the air temperature is  $24^{\circ}\text{C}$  and below.

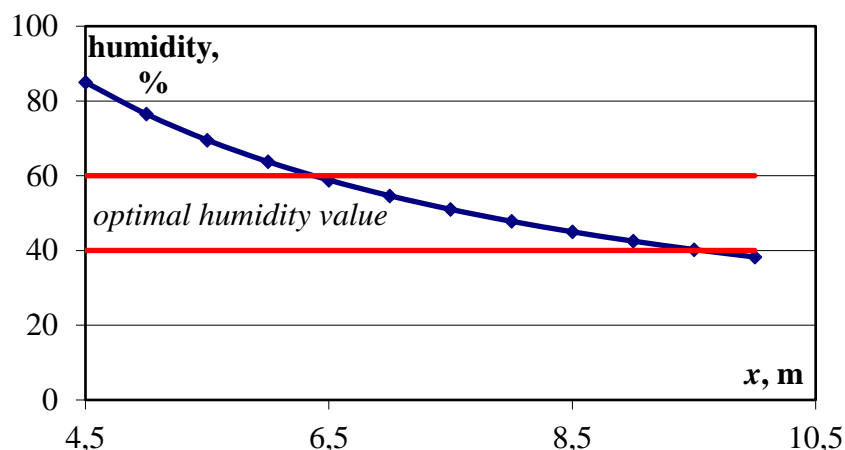
Figures 19 – 20 present the distribution of temperature and relative humidity on the territory of an open cafe.



**Figure 19.** Temperature distribution on the territory of an open cafe

Figure 19 shows the temperature distribution on the territory of the cafe between points 6 and 7 (Fig. 16) and at a distance of  $8.3\text{ m}$  the temperature corresponds to the optimal air temperature in the working area, i.e. cafe employees at a distance between  $4.5\text{ m}$  and  $8.3\text{ m}$  are in the zone of exceeding  $T_{opt}$ .

Figure 20 shows the distribution of relative humidity in the cafe area between points 6 and 7 (Fig. 16) and at a distance of  $6.2\text{ m}\text{--}9.4\text{ m}$  the relative humidity corresponds to the optimal value of humidity in the working area, but cafe employees at a distance between  $4.5\text{ m}$  and  $6.5\text{ m}$  are in the zone of excess relative air humidity.



**Figure 20.** Distribution of relative humidity on the territory of an open cafe

A comprehensive method of evaluating microclimate parameters in work zones in open areas has been developed which allows predicting the level of humidity and temperature in work zones in the presence of the use of an artificial air humidifier.

**Conclusions.** The numerical and full-scale experimental studies conducted allowed us to solve the problem of forecasting microclimate parameters in the working area in an open area when using humidification. The conducted experimental and numerical studies confirmed the reliability of the developed forecast method with a numerical modeling error of 5–7%. A comprehensive method for evaluating microclimate parameters in work zones in open areas of industrial sites has been developed, which allows forecasting the wind regime, humidity and temperature in work zones in the presence of the use of an artificial air humidifier.



## **10.2 Analysis of world experience in state regulation and reform of the thermal power industry**

In the context of increasingly harsh global social environment, energy conservation, emission reduction and environmental protection has become an important issue of global green development. As an important sector in the field of energy, the heating industry's high energy consumption, high pollution, low efficiency and other problems have become one of the outstanding problems that need to be solved globally. Therefore, governments have taken measures to regulate the heating industry in order to reduce energy consumption, reduce pollution and protect the ecological environment.

It is of great purpose and significance for the government to regulate the heating industry. On the one hand, it can protect the environment, reduce energy consumption, improve resource utilization and promote sustainable economic development. On the other hand, government regulation can guide social and market behavior, regulate the development of the industry, improve the development level of the industry, and promote the sustainable development of the country and the industry.

### **10.2.1.1 Regulation reform and development of heating industry in European countries**

#### **1.1.1 Germany**

The German government attaches great importance to how to collect heat cost and how to formulate price system. As early as 1981, on the basis of the energy Conservation Law established by the state in 1976, Germany promulgated the provisions on heating charging. The law extended the requirement of installing household heat metering devices to all new and existing apartments of multi-storey buildings. Residents paid according to the measured heat consumption, but limited to the technical conditions at that time, the law did not stipulate the compulsory heat metering technology. After reunification, the law was revised to require that high-rise residential buildings in Germany be fitted with heat-metering devices by 1995. So far,

about 98 percent of apartment residents have installed heat metering devices and pay heat fees based on the metering[519].

The system reform of heating industry in the former East Germany went through difficulties and finally established the heating system based on heat metering and charging. In the early days, urban heating in East Germany was charged by area, and the indoor heating system was a single pipe vertical sequential system under government control. In order to implement the charge by calorimeter in the whole country, residents' original indoor heating single pipe vertical sequential system must be reformed[520].

The main factors affecting the amount of fixed cost are the heat transfer loss of hot and non-hot walls in public buildings, the investment in heat network construction, the location of each floor and the orientation of the house, and so on. This part of the cost is rigid.

Here, for the fixed cost of heat cost, European countries have no uniform regulations on the above proportion, usually between 30% and 50% to choose. But began to implement heat metering charges, fixed charges charged a higher proportion, but generally not more than 50%. Up to now, the measurement of heat charge in the German heating industry has achieved the goal of accurately measuring the actual heat used by residents under the impetus of the innovation of heat metering technology. The measurement of heat charge still adopts two heat production charges, and the fixed charges have been subsidized by the government. The fixed heat charges actually paid by residents account for less than 20% of the whole heat charges.

#### 1.1.2 France

Before the oil crisis, energy in France was very cheap. The heating cost of heating enterprises is relatively low, and the heating cost for consumers is almost negligible. So for the whole heating related industry, there is no awareness of energy conservation. Both housing design units and heating construction units are trying to use the cheapest heating equipment, heating enterprises do not pay attention to improving heating efficiency, and do not consider the use of energy-saving equipment.

After the outbreak of the oil crisis, heating costs and heating costs rose sharply, which prompted the French government, heating industry, consumers and other stakeholders to adopt a series of methods to reduce heating costs and reduce heating energy consumption. To this end, the French government set up the "Energy Conservation Bureau", specializing in the study of energy-saving measures, and through legislation to ensure the implementation of these measures, at the same time to widely publicize the awareness of energy conservation and adopt a lot of energy-saving measures: first, set up a high insulation standard for building materials, to provide financial help for building insulation improvement projects; Second, in order to ensure the normal use of heat for residents, the mandatory installation of temperature control equipment for all new and old buildings, so that the heat supply is stable.

In France, at present, only about 1/3 of the households use the household heat meter and evaporation dispenser to calculate the heat fee, and about 2/3 of the residents are based on the overall heat meter reading at the thermal entrance of the building, according to the user's living area to share the heat fee. Although the French government introduced this metering charge model from the original point of view is an energy-saving measure caused by the energy crisis and forced to take, but in the implementation process of this measure, the French Energy Conservation Bureau has done many tests to verify the energy-saving effect, the fact shows that the energy-saving effect is obvious, effectively improve the heating efficiency of the heating industry. The Energy Administration has conducted experiments that show energy savings of 15 to 25 percent in the two years since metered heating was fully implemented. The French government officially puts the figure at 15% and uses that as the basis for its economic return on investment[521].

The characteristics of district heating in French cities (take Paris as an example) can be summarized into the following three aspects: First, the distribution characteristics of main heat sources. Paris pays attention to energy conservation, environmental protection and efficiency in heating. Under the premise of constantly improving the efficiency of heating industry, Paris constantly develops a series of scientific research activities such as new energy and regenerated heat source, and

transfers heating energy to gas, natural gas and waste incineration. Second, the charging profile of central heating. There are two main modes of charging for district heating in Paris, which are recognized by heating enterprises and consumers. The two charging modes are: one is fixed charging mode, and the other is proportional charging mode. Third, the heating method. The main way of central heating in Paris, France is steam central heating. Making full use of renewable energy and cogeneration is also a major feature of Paris heat supply.

### 1.1.3 Ukraine

As an important part of the Ukrainian economy, the Ukrainian heat supply industry is of great importance to the economic development and social stability of the country. However, the heating industry in Ukraine faces a series of challenges, such as low efficiency, high energy consumption, high maintenance costs and high heating prices, due to long-standing regulatory regulations and problems with the operation mode of heating enterprises.

The main problems in Ukraine's heating industry lie in its market structure and regulatory system. In the traditional sense, the heat supply industry is monopolized by state-owned heat supply enterprises, while the government implements a package of price and quality supervision, resulting in the actual price of heat supply service can not reflect the real supply cost, which leads to the waste of energy and resources in thermal power plants. The resulting economic losses and environmental pollution also make the economic sustainability of the heating industry in Ukraine unguaranteed.

The Ukrainian heating industry is facing major challenges in regulatory reform and development as the Ukrainian government works to strengthen energy independence and sustainable development. The following are the main aspects of regulation reform and development of the heating industry in Ukraine:

First, separate electricity and heat markets. The government plans to separate the electricity and heat markets and introduce market reforms in each. In the heat market, the government will promote market regulation and standardized operation, strengthen supervision and supervision, establish a legal competition mechanism, protect consumers' rights and interests, and encourage more private investment.

Second, improve energy efficiency. The Government of Ukraine has adopted a series of policy measures to encourage and support heating enterprises to implement energy-saving and energy efficiency improvement measures in order to reduce energy waste and environmental pollution and reduce heating costs.

Third, promote the use of renewable energy. The Ukrainian government is also pursuing a renewable energy development policy, encouraging heating companies to switch to renewable energy sources, such as solar energy and geothermal energy, through national energy policies, regulations and financial support.

Fourth, strengthen supervision and safety management. The Ukrainian government has strengthened the supervision and safety management requirements of heating enterprises, and strengthened the safety standards and maintenance requirements of heating facilities to ensure the safety and reliability of heating operations.

The reform and development of Ukrainian heating regulations is an important way to transform Ukrainian heating industry into a green and sustainable development. The government shall, in light of the actual situation, formulate reasonable policies and measures to gradually guide and encourage the Ukrainian heat supply industry to achieve sustainable development and improve its business level, so as to make its own contribution to the sustainable economic development and social stability of the country.

#### 1.1.4 Russia

Russia's heating mode is mainly based on central heating. As a world power, Russia occupies an extremely important position in the world from the aspects of comprehensive heating technology.

Since the 1930s, the Soviet Union has regarded heating industry as a major national policy in a series of major conferences as an important agenda. Therefore, over the past decades, a number of professionals and scientific and technical teams engaged in hot power engineering have been trained and established. After World War II, the Soviet Union's energy production skyrocketed, quickly becoming the largest in Europe and second in the world, after the United States[522]. Electricity production and

consumption double every 12 to 13 years, and heat production and consumption double every 15 to 18 years. 80% of the country's heat consumption is supplied by central heating sources, more than half of which rely on thermal power plants[523].

Although Russia is rich in energy resources, with the development of economy, Russia's heating industry consumes a lot of energy, and Russia attaches more and more importance to energy conservation. In general, the characteristics of the development of district heating in Russia are as follows:

First, Russia considers cogeneration to be the highest and most perfect form of district heating. Taking the thermal power plant as the main heat source for central heating and the thermal power plant as an important part of the power industry, various measures have been taken to improve the economy and reduce the consumption of specific fuel for power generation.

Second, the research solves the design, economic operation, optimization and adjustment of the heat network when a variety of loads, especially the heating and hot water supply loads coexist, the connection form between the heat network households and the heat network and the water conservancy conditions and other problems.

Third, developed and applied a series of central heating technology and equipment. Energy conservation and environmental protection are closely linked. The research on nuclear heating technology and high energy fuel has also achieved results.

### **10.2.1.2 Reform and development of heating industry regulation in Asian countries**

#### **1.2.1 China**

With the increasing shortage of energy and the enhancement of environmental awareness, the heating industry has gradually become the focus of social attention. In China, the heating industry has always been in the predicament of high pollution, high energy consumption and low efficiency. Therefore, the reform and development of industry supervision have become the necessary measures and important means for China to save energy and reduce emissions and build a beautiful China. The heating

industry generally includes boiler fuel, radiator and pipe parts[524]. In the past, there were the following problems in the regulation of China's heating industry:

First, the lack of regulations is not perfect. Although there are relevant policies and regulations, such as "boiler room management Measures", "heat dissipation equipment energy-saving evaluation code", but the current legal system is not complete, need to be further improved[525].

Second, the standards are not uniform. Due to the different conditions of the heating industry in China, the industry standards lack of uniformity and consistency, which makes it difficult to achieve standardized and standardized management.

Third, supervision lacks strength. Management departments lack professional skills, supervision is not strong enough, and enterprise self-discipline is not strict, leading to the existence of safety risks in some enterprises and serious confusion in environmental standards[526].

In response to these regulatory issues, China has adopted the following measures:

First, establish sound regulations and standards. Government departments should actively promote industry-related regulations and standards, adhere to the "system first, then practice" when formulating standards and management methods, adopt the way of multi-party communication and widely solicit public opinion, so that every industry participant can jointly abide by.

Second, we need to strengthen oversight. Governments at all levels should strengthen industry supervision in accordance with the law, increase the punishment of enterprises and producers for violations of laws and regulations, and at the same time, strengthen relevant supporting policies to encourage good enterprises and market access.

Third, promote smart and clean energy equipment. New technologies, such as intelligent heating technology, gas-fired boilers, wind and solar energy, can greatly reduce energy consumption and pollution, and their popularization and application will promote the adjustment of energy structure and promote the sustainable development of green economy in the whole society.

The development of China's heating industry regulatory reform needs the cooperation of the government, enterprises and the market to form a multi-dimensional force such as deleveraging, subtraction quantification and regulation institutionalization. On the basis of strengthening supervision, we should actively introduce new technology, establish a comprehensive mechanism and complete legal system, promote the standardization and professional development of heating industry, benefit the society and protect the ecological environment[527].

### 1.2.2 South Korea

The development time of South Korea's heating industry is the same as that of China. Its rapid development in just a few decades is inseparable from their scientific regulation. South Korean law stipulates that heating energy consumption must be measured by hot water flowmeter. South Korea initially used household heat meters, and later passed a law allowing the use of hot water meters for household metering. In South Korea, about 600,000 customers are heated and supplied with domestic hot water by district heating systems throughout the year. The District heating Company is responsible for the installation of the heat exchange stations and heat meters, and is responsible for the monthly heating and domestic hot water fees to the housing company, which is responsible for the operation and maintenance of the heat exchange stations and the collection of monthly heat fees from the users. Each heat bill consists of a fixed part and a variable part. In the case of household distribution, the variation is equal to the heat supplier's heat price multiplied by the heat meter reading plus 10%, which takes into account the network loss between the heat exchange station and the points of consumption.

South Korea has its own unique way of measuring heat. South Korea is the only country with a law requiring the use of hot water flowmeters to measure heating energy consumption. In the beginning, South Korea stipulated that centralized heating buildings must use household metering, and then switched to hot water meters for household metering. The main reason for this change is that the performance of the heat meter developed at that time is poor, and because of the poor heating water quality to accelerate the wear of the flow metering components, so the heat meter must be



repaired frequently. And the battery in the meter has a life expectancy of only five years. At present, the heating method in South Korea is mainly using low-temperature hot water floor radiation heating. The flow rate of circulating water is large and the temperature difference is small, so the accuracy of heat consumption allocation calculation of hot water meter is greatly improved, and the cost of this hot water meter is low.

### 1.2.3 Japan

The development of district heating system in Japan is fast, and the development is different in different regions. Japan's heating industry uses a quota system and a two-step charging system. The reform of heating supply in Japan mainly focuses on the reform of charging system. For different heating properties of users almost all use two-step charging system. For some customers with small differences in the amount of heating, the use of a single quota charging system. Heating expenses are determined by the following expenses, that is, on the premise of appropriate heat supply and demand planning, from the total calculated manufacturing expenses, selling expenses, general administrative expenses and non-operating expenses, minus the balance of the amount to be deducted, plus a reasonable amount of profit.

In Japan, a large number of customers are the most basic force to decide the charging system. Whether to establish a charging system that residents think is fair and reasonable is the main purpose of the Japanese government to control the price of heating industry. At present, there are two kinds of charging in the heating industry in Japan: the quota system and the two-part charging system (the fixed fee plus the actual heat metering fee). The characteristics of the quota system are: mainly applicable to some users with small differences in the amount of heating, eliminate the cost of the calculation of complex heating amount and heating fees, only need to be simple for the price is cheap, the use of a single quota system, and the regional heating almost all use two charging system. The main feature of the two-part system is that a fixed portion is used as the basic cost of heat, while a variable portion is charged according to how much heat the household actually uses. The basic price of heating is based on the proper

heat supply and demand market, the normal operation of heating enterprises and the consumption level of consumers.

Generally speaking, the heating condition in Japan has the following characteristics:

First, the rapid development of the district heating system, especially in the Kanto region with Tokyo as the center, currently accounts for 60% of the country's district heating area.

Second, the district heating system in Japan is mostly small-scale and mostly used in office buildings and other business facilities, with a small proportion used in residential buildings.

Third, Japan's heating system attaches great importance to energy conservation and environmental protection. Japan is one of the industrialized developed countries with the most scarce energy resources in the world, but its comprehensive energy utilization efficiency is also one of the highest in the world. The Japanese government has invested heavily in the development of a number of energy-saving and environmental technologies, such as thermoelectric supply systems, heat storage tanks and the use of urban waste heat as energy sources, to improve energy efficiency.

### **10.2.1.3 Experience of government regulation of heating industry in foreign countries**

In foreign theoretical circles, the research scope of heating industry is mainly limited to the industry that directly provides heat energy for cities that need heating in winter. It is believed that the main heating modes include: combined heating, coal-fired boiler heating, electric heating, heat pump unit heating, cogeneration of heat and power, large heat source central heating, etc. It can be divided into coal heating, oil heating, natural gas heating, electric energy heating, nuclear heating, geothermal heating, solar heating and so on. Central heating includes cogeneration, central boiler house, industrial waste heat, geothermal, nuclear, etc. Urban central heating system consists of three parts: heat source, heat network and heat user. Heating facilities in cold northern regions is one of the very important infrastructure, is an important part of public utilities, is the basic needs of urban residents, it plays a pivotal role in the

comprehensive development of urban economy and society. It is precisely because the heating service has the characteristics of low substitutability, non-exclusivity, public welfare and publicity, so it has the characteristics of quasi-public goods.

Heat is a commodity, and heat prices consist of costs and profits and taxes. The calculation method of heating costs is generally the same in different countries, and the difference is in the value of profits and taxes. The European district heating industry does not aim at profit, but operates according to commercial behavior. All its profits are used to repay loans, invest or reduce heat charges of heat users, and to improve the investment of heating system, improve the efficiency of heating and transmission, reduce heat consumption and reduce costs.

In foreign countries, France, Germany, Russia and other countries have successfully reformed the heating industry system. From the development of heat meters, the formulation of standards, the detection and use of instruments, the collection of heat charges and the regulation of heating prices, the development of the heating industry and the government regulation system in these countries have been quite mature. The system reform of heating industry involves a wide range of areas and a complex system. Some foreign countries have also gone through a tortuous course in the system reform. For example, Germany, South Korea, Japan and other countries mainly reform the heating charging system and charging methods. While carrying out the above reforms, they have successfully explored the transformation of the investment and financing system of the heating industry[528]. The development of heating industry in European countries is very successful, which is worth our reference.

These current heating countries have taken measures suitable for their national conditions to stimulate users to use heat according to demand, and have achieved obvious energy-saving effects and social justice. The implementation of household metering of electricity, gas, heating and water, household heat metering charges are relatively advanced countries, such as Germany through the law to enforce the introduction of heat metering charges, formulate basic provisions for heat metering, implement preferential policies to encourage heat metering charges.

For the natural monopoly industry, especially the reform of public utilities in various countries, the overall goal of local government regulation should also be to realize the optimal allocation of resources and maximize social welfare, and the methods and approaches to achieve this are to combine the competitive market mechanism with government regulation and make it operate effectively. Under the conditions of market competition and on the basis of government regulation, The government regulation system should be established to form and maintain an effective competitive market, and the balance of government regulation should be constantly adjusted and realized by using the two forces of market and government.

The content of government regulation in foreign heat supply industry is extensive, including: market entry (exit) regulation, price regulation, legal regulation, quality regulation, environmental regulation, etc. As a special commodity, heat can not be measured by the performance, life, reliability, safety, economy and other standards of industrial products, which also increases the operational space of regulating the heating market government regulations, but also leaves room for institutional innovation for government intervention in the heating industry[529].

Through the practice of government regulation of heating industry in typical Eurasian countries, several enlightenments can be drawn:

First, we will improve the pricing system for heat supply. Heating price is the most sensitive topic for residents and heating enterprises. Perfect heating price system is the key to promote the stable and healthy development of heating industry. In order to make heat really become a commodity, we must change the phenomenon of heat cost and heat disconnection, really can realize how much heat, pay how much money, this must do the household control of heat, the use of heat meter for household measurement. From the process of the international heating reform, the heat charge collection method basically goes through two stages, one is according to the building area charge, the other is according to the use of heat charge, that is, metering charge. And in the metering charge, the composition structure of the heat price is clearly proposed, that is, the components of the heat price are fixed cost and floating cost[530]. It can be seen that for China, which is charging by area, heat metering charge is the

only choice, and it is imperative to carry out heat metering charge. The reform practice of two-part heat charging system will be further deepened, opening up a way for the establishment of a perfect heating price system.

Second, strengthen the heat supply industry technological innovation. Many European countries have done a lot of scientific research in the field of district heating, and the government's strong support has enabled the heating technology and products to be transported overseas. For example, Ivo Group of Finland is a multinational group engaged in environmental protection and energy conservation research. Its main task is to provide detailed consulting services on electricity generation and transportation, operation and maintenance, project development and investment, so as to improve its brand image. While developing technology, developed countries attach importance to the product quality of heating equipment, so as to ensure the reliability of heating system. Most of their heating equipment manufacturers have obtained the ISO quality system certification, with very good experimental equipment, so that the product can be constantly updated and reformed. In the process of product production, we have carried out comprehensive quality management for each process to ensure 100% qualified rate of factory products[531].

Third, the proper introduction of competition mechanism. Introducing regional competition mechanism is a good way to reform heat supply industry under the market economy system. For a long time, the heat supply industry has been monopolized by the central or local governments. Due to the lack of competition, enterprises relax internal management and technological innovation, resulting in low production efficiency and low allocation efficiency. The government should take the heat supply industry as the focus of regulation, establish a management mechanism simulating competition mechanism, so that the heat supply and heat source are operated by many enterprises competitively, give full play to the role of competition mechanism, and generally make the whole heat supply industry in an effective competition state compatible with scale economy and competitive vitality[532].

Fourth, social regulation is particularly necessary. In order to realize heating energy saving and build a conservation-oriented society, the government plays a crucial

role. The first thing to do is to improve the consciousness of energy conservation of the whole society, for the joint construction of a conservation-oriented society and efforts. The government can make extensive use of television, the Internet, newspapers and other media to strengthen the publicity of energy conservation, and carry out energy conservation activities in enterprises, public institutions, communities and other places to raise residents' awareness of energy conservation, and turn resource conservation into a conscious action of everyone. In order to improve the energy efficiency of heating, the government should publicize the advantages of central heating in energy saving and environmental protection, and at the same time implement corresponding policy subsidies to the users of central heating, so as to reflect the economic superiority of central heating and make more users choose the central heating. Central heating is one of the important symbols of modern city construction. The main goal is to make full use of energy, save energy and protect the environment. In order to effectively solve the problem of energy reserve shortage in China, local governments should actively develop and utilize a variety of renewable resources and clean energy, and gradually explore the use of nuclear energy, geothermal energy, garbage, solar energy, biogas, biogas and other energy sources as heating sources. While making full use of existing resources, European countries have also made great efforts in the utilization of waste resources such as garbage and wood chips, which has provided valuable experience for China in the development and utilization of waste resources. In view of China's current economic and technological conditions, garbage is a feasible heating energy with good social and environmental benefits. The recycling and utilization of various industrial and household wastes can generate heat energy for production and living use, which not only saves the problem of energy shortage, but also is conducive to environmental protection and can get better economic benefits. So the national energy sector should adopt corresponding policies.

#### **10.2.1.4 Suggestions on improving the efficiency of government regulation in the heating industry**

With climate change and increasing energy consumption, the regulation of the heating industry is getting more and more attention. As a regulatory department, the

government bears the important responsibility of maintaining the stability and healthy development of the heating industry. However, due to various reasons, there are still some deficiencies in the regulatory efficiency of the current government on the heating industry. The following are suggestions to improve the efficiency of government regulation of the heating industry:

First, establish a sound regulatory system. The government should formulate stricter laws and regulations and establish a sound regulatory system and mechanism, including policies and measures, regulatory agencies and regulatory processes. Especially in the quality supervision of heating enterprises and products, the government should provide more human, material and financial support for the regulatory authorities, so as to make the regulatory authorities more accurate, strict and effective in quality supervision.

Second, improve the quality of supervision personnel. The professional quality and supervision ability of supervisors directly affect the efficiency of supervision. Therefore, the government should strengthen the training and education of regulators, improve their professional quality, build a high-quality team, and ensure that the regulatory work has a wide coverage, strict standards and strong execution.

Third, strengthen communication and coordination with heating enterprises. The government should strengthen communication and coordination with heating enterprises and related industries, understand the actual situation and needs of enterprises, and provide them with better regulatory services. This can not only fully protect the interests of enterprises, but also standardize the management of the heating industry and achieve common development.

Fourth, establish a public supervision mechanism. The government should establish a public supervision mechanism so that the public can participate in the supervision work, improve the transparency and fairness of the supervision work, and speed up the efficiency of the supervision. Public supervision will enable regulators to pay more attention to the public interest and help the government find and solve problems.

These are some suggestions to improve the efficiency of government regulation of the heating industry. Through these suggestions, the government can improve the efficiency of supervision from many aspects and more effectively maintain the healthy and orderly development of the industry.

### **Conclusion**

Heating industry is one of the important components of public utilities, its development directly affects the development of national economy. Heat supply not only involves the interests of thousands of households, but also affects the development of heat supply enterprises and social stability. Therefore, perfect government regulation plays a pivotal role in the future of heat supply industry. As the system reform of heating industry is a complex system project, it involves the interests of residents, and involves the interests of units and enterprises, and is related to a number of related policies such as finance, price, social security, and at the same time, there are metering charges and technology and other issues, so the reform of heating industry is very difficult. The reform of heating industry not only needs to be old and new, but also needs to combine several systems, provide comprehensive support, and promote together. In addition, it also faces many technical difficulties, so it is necessary to vigorously develop technological innovation, which is the prerequisite for ensuring sustainable development. In the process of innovation, constant comparison and revision are needed. Be prepared for the long haul. It will be a long and complicated process. Each country has its own characteristics, so it needs to adapt to local conditions, select the essence and discard the dregs, and formulate appropriate government regulations based on the current situation of the country.



## SECTION 11. MECHANICAL ENGINEERING

DOI: 10.46299/ISG.2024.MONO.TECH.4.11.1

### **11.1 Manufacturing of spur gears by a new method of continuous forming with disc milling cutters**

Cylindrical gears are used in modern machines and mechanisms used in mechanical engineering, mining, transport, construction, and agricultural industries. The functional characteristics of gears are ensured during gear manufacturing in gear milling operations. Gear milling operations are characterized by high technological cost, which is determined by relatively low productivity, high cost of tools, and significant operating costs. The development of effective technologies for manufacturing cylindrical gears with the necessary functional characteristics is a crucial task in modern mechanical engineering production.

The functional characteristics of modern cylindrical gears, defined by their load capacity and accuracy, are achieved through gear-cutting operations performed on gear-milling machines that utilize worm cutters of the appropriate accuracy classes. Worm cutters are among the most complex and expensive metal-cutting tools. Gear milling with worm cutters on gear milling machines ensures the production of cylindrical gears with an involute tooth profile that has significant limitations in terms of load capacity. The gear milling process using worm cutters involves interdependent cutting and profiling processes, which prevents the intensification of this process. Moreover, the properties of modern tool materials and machines are not fully utilized [533, 534].

Improvement of the operational characteristics of cylindrical gears is carried out by using cylindrical gears wheels with non-involute types of engagements formed by concave-convex profiles of the teeth of the wheels, in particular, the Novikov profile, the S-profile [535-537] and the sinusoidal profile [538-541]. Cylindrical gears with the mentioned tooth profiles are characterized by high-performance indicators such as high load capacity, low vibration and noise levels [541]. However, the previously mentioned cylindrical gears are not widely used because their manufacture is accompanied by

significant technological difficulties, which are associated with the lack of appropriate cutting tools or the use of complex, expensive multi-axis machines with CNC [539, 540]. As a result, the development of new technological processes for cutting cylindrical gears with a convex-concave or involute modified tooth profile is one of the promising areas of scientific research.

New tooth cutting processes include a method based on the use of disk cutters (not profiled according to an involute profile), which are given a certain kinematic shaping movement, which ensures the production of cylindrical gears with new concave-convex or modified involute tooth profiles [542-545]. In the new gear cutting process, the disk cutter receives a reciprocating motion in the radial direction of the gear wheel while the gear wheel continuously rotates at a constant angular velocity that is consistent with the reciprocating motion of the disk cutter. The process of obtaining a convex-concave tooth profile on cylindrical gears with a disc-shaped non-profiled cutter can be carried out on traditional gear milling machines. The disk cutter is mounted on the machine tool arbor of a gear milling machine with a certain eccentricity (radial displacement relative to the axis of rotation of the tool arbor), which is determined by the gear module. The gear blank rotates continuously around its axis. Synchronous and mutually coordinated movements of the disk cutter with the rotation of the gear being cut ensure the cutting of teeth with a sinusoidal profile [541-543]. However, this area of research is characterized by the fact that the obtained ratios do not take into account the actual features of the tooth-cutting process, so they do not provide for the production of cylindrical gears with tooth profiles suitable for use in gear transmissions. The studies are being carried out that take into account the actual geometric characteristics of the cutting, shaping part of the teeth of the disk cutter and the kinematic features of the tooth-cutting process, which consist of a periodic, continuous change in the angular speed of rotation of the eccentric machine tool mandrel with a disk tool [544, 545] to ensure the production of gear crowns on cylindrical gears with workable tooth profiles. However, for the practical application of the radial-circular shaping method, with full use of the corresponding characteristics, detailed modeling of the shaping of the profiles of the teeth of cylindrical gears by the

side surfaces of the cutting teeth of the disk cutter that form the initial tool surface, is required.

*The study aimed to simulate the process of cutting cylindrical gears using the continuous shaping method of tooth profiles with non-profiled disk milling cutters (CSTDC).*

**Research results.** The CSTDC method for cutting cylindrical gears differs from the gear milling process with worm cutters. The CSTDC method is carried out on gear milling machines with similar technological settings as those used for gear milling with worm cutters. A disk cutter is installed with a radial offset of eccentricity  $e$  on the tool holder of the gear milling machine, the axis of which coincides with the axis of rotation of the gear milling machine spindle.

The process diagram is shown in Figure 1.

Continuous rotation of the tool holder and the disk cutter, coordinated with the rotation of the cylindrical gear being cut, ensures periodic deepening and exit of the disk cutter from the formed inter-tooth cavity of the resulting gear, creating a profile on the two side surfaces of the cylindrical gear tooth.

The mutually kinematically coordinated rotations of the spindle with the tool holder and the table of the gear milling machine ensure continuous uniform division of the gear wheel blank into the appropriate number of teeth. The used disk milling cutter with cutting teeth of a certain width causes the gear wheel teeth to be cut with a tooth thickness that is less than the required width by an amount approximately equal to twice the width of the principal cutting edge of the disk milling cutter tooth. Neglecting this feature of the gear-cutting process leads to the production of inoperable gears.

This drawback is proposed to be eliminated by changing the law of rotational motion of the disk cutter - by giving the eccentric part of the tool holder together with the disk cutter periodic uneven rotation. For this, an additional device for changing the angular velocity is installed on the tool holder. The input link of this device is connected to the spindle of the gear milling machine, and the output link is connected to the eccentric bushing on which the installed disk cutter is fixed. The angular velocity change device provides a determined slow rotational movement of the disk cutter when

entering the inter-tooth cavity of the gear being cut and accelerated rotational movement when the disk cutter exits the inter-tooth cavity. Thanks to this, a disk milling cutter produces cylindrical gear teeth of the required thickness with a profile close to a modified involute profile, known for its enhanced operational characteristics [544, 545].

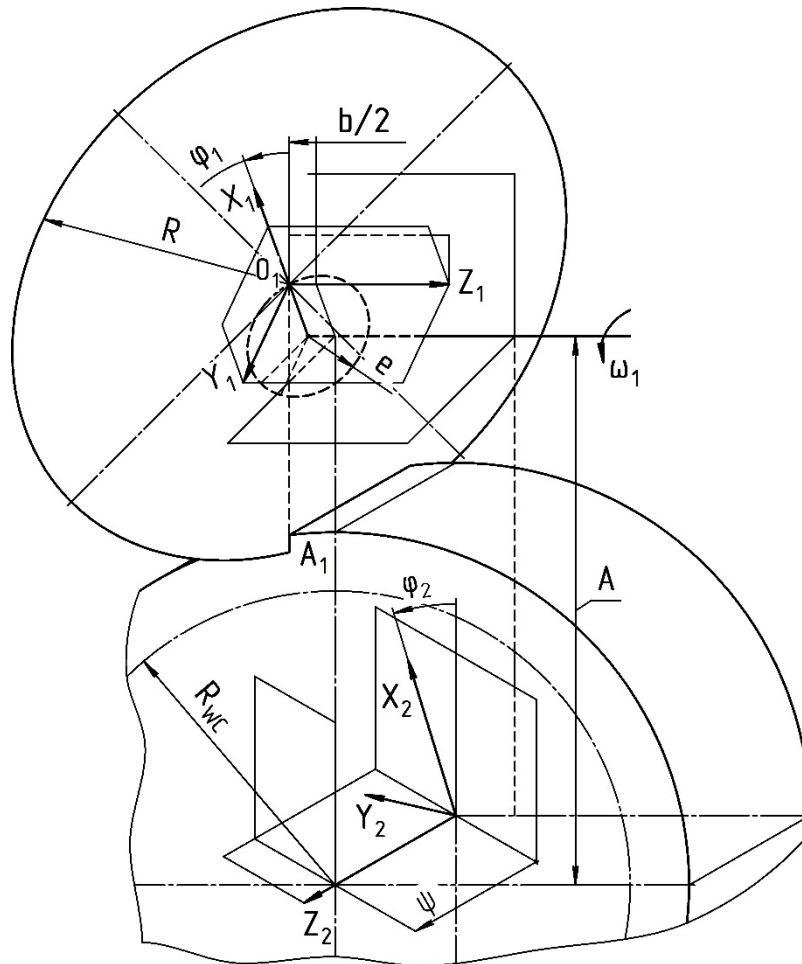


Figure 1. Scheme of continuous shaping of cylindrical gear tooth profiles with a disk milling cutter

These features define a new method of tooth cutting of cylindrical gears - the continuous shaping method of tooth profiles with non-profiled disk milling cutters (CSTDC).

The angular velocity change device, together with the tool holder of the gear milling machine, provides the disk cutter with a rotational motion with a periodically changing angular velocity  $\omega_1$ . The tool holder receives rotational motion from the spindle of the gear milling machine with a constant angular velocity  $\omega_{01}$ . The angular

velocity  $\omega_{01}$  of the rotation of the spur gear is related by the relation  $\omega_2 = Z \cdot \omega_{01}$ , where  $Z$  is the number of teeth of the spur gear.

The angular velocity change device consists of one or two pairs of identical cylindrical gears having a similar offset of the tooth crown gears relative to their axes of rotation. In the angular velocity change device, each cylindrical gear has the offset of the tooth crown gear  $e_r$ , the number of teeth  $Z_{01}$ , the radii of the initial circles  $R_{01}$  and the similar centre distance  $l_r$  in one pair of gears ( $l_r = 2R_{01}$ ). The uneven angle of rotation  $\varphi_1$  of the output link of the angular velocity change device, which is connected to the eccentric part of the tool holder and the disk cutter, is determined relative to the uniform angle of rotation  $\varphi_{01}$  of the spindle of the gear milling machine by the following dependence:

$$\varphi_1 = 2 \cdot \operatorname{arctg} \left( \left( \frac{l_r - e_r}{l_r + e_r} \right)^k \cdot \operatorname{tg} \frac{\varphi_{01}}{2} \right), \quad (1)$$

where  $k$  is the number of identical pairs of wheels with offset gear rims.

The widespread use of wheels with involute profile teeth in gear transmissions encourages the adoption of the CSTDC method, which is promising for gear cutting to obtain cylindrical gears with a modified involute profile of the teeth. To do this, it is necessary to obtain a ratio for determining the value of the technological parameter - eccentricity ( $e$ ) of the installation of a disk cutter on the tool holder of a gear milling machine. Modeling of the gear-cutting process with a disk cutter using the CSTDC method is carried out based on the analysis of the parameters of the involute and convexo-concave modified profile of the teeth of the cylindrical gear shown in Figure 2.

The condition of compatibility of profiles is determined by the coincidence of points  $M_c$  and  $M_e$ , which belong to the convex-concave modified and involute profiles, respectively, which is ensured by the equality of the radius vectors of points  $M_c$  and  $M_e$  (respectively  $R_{mc}$  and  $R_{me}$ ) and the central angles (respectively  $\delta_c$  and  $\delta_e$ ):  
 $R_{me} = R_{mc}$  and  $\delta_e = \delta_c$ .



where  $b_c$  is the width of the cutting edge of the disk cutter;  $e$  is the eccentricity of the disk cutter installation on the tool holder;  $m$  is the module of the cylindrical gear wheel.

The uneven angle of rotation  $\varphi_1$  is determined by expression (1).

The central angle of rotation  $\delta_c$  of the radius vector  $R_{mc}$  is determined using the expressions:

$$\begin{aligned}\delta_c &= \delta_{ec} - \theta_{bc} , \\ \delta_c &= \frac{\varphi_{01}}{Z} - \arcsin \frac{b_c}{2 \cdot R_{mc}} ,\end{aligned}\quad (6)$$

where  $\delta_{ec}$  and  $\theta_{bc}$  are respectively the central angles of rotation of the disk cutter and half of the cutting edge of the disk cutter.

Applying dependencies (3) – (6), we obtain the final expression for determining the polar coordinates of points of a convexo-concave modified profile in which the sought, unknown factor is the eccentricity:

$$R_{mc} = \sqrt{\left(\frac{1}{2} \cdot m \cdot Z - 1,25 \cdot m + e \cdot (1 + e \cdot \cos \varphi_1)\right)^2 + \left(\frac{b_c}{2}\right)^2} . \quad (7)$$

The characteristics of the involute profile (see Figure 2 (a)) determine the radius-vector  $R_{me}$  and polar angle  $\delta_e$  of the point  $M_e$  of the involute profile that is potentially formed by the cutting edge of the tooth of the disk cutter. For the involute profile, the radius-vector  $R_{me}$  and polar angle  $\delta_e$  are set according to the following relations:

$$R_{me} = R_{we} \cdot \frac{\cos \alpha_{we}}{\cos \alpha_e} ; \quad (8)$$

$$\delta_e = \theta_{me} - \theta_e , \quad (9)$$

where  $\alpha_{we}$  and  $\alpha_e$  are the pressure angles at the involute points, respectively, on the pitch circle  $R_{we}$  with radius and the considered circle with radius  $R_{me}$ ;  $\theta_{me}$  is the angle between the plane of symmetry of the tooth and the beginning of the involute;  $\theta_e$  is the involute angle at the involute point  $M_e$ .

Using the relation for the involute profile, we obtain:

$$\theta_{me} = \theta_{we} + \delta_{we} , \quad (10)$$

$$\theta_{we} = \operatorname{tg} \alpha_{we} - \alpha_{we}, \quad (11)$$

$$\theta_e = \operatorname{tg} \alpha_e - \alpha_e, \quad (12)$$

$$\delta_{we} = \frac{\pi}{2 \cdot Z} \quad (13)$$

where  $\theta_{we}$  is the involute angle at the involute point on the pitch circle with radius  $R_{we}$ ;  $\delta_{we}$  is the central angle between the plane of symmetry of the tooth and the radius-vector of the pitch circle point  $R_{we}$ ;  $\alpha_{we}$  and  $\alpha_e$  are the involute pressure angle at a certain involute point and at the involute point on the pitch circle, respectively.

The pressure angle  $\alpha_{we}$  at the involute point on the pitch circle  $R_{we}$  is equal to the normal profile angle and is for a standard involute profile  $\alpha_{we} = 20^\circ$ .

The value of the central angle  $\delta_{we}$  is set taking into account the fact that on the pitch circle the tooth thickness  $s_{we}$  and the width of the intertooth cavity  $e_{we}$  are equal and depend on the number of teeth of the wheel  $Z$ , the module and are determined by the value of half the normal pitch  $s_{we} = \pi \cdot m / 2$ . The pressure angle varying  $\alpha_e$  along the involute is determined by expression (8).

Using dependencies (8) – (13) and taking into account  $R_{me} = R_{mc}$ , we obtain the original equation for determining the unknown radius-vector  $R_{mc}$ :

$$\begin{aligned} & (\operatorname{tg} \alpha_{we} - \alpha_{we}) - \operatorname{tg} \left( \arccos \left( \frac{R_{we}}{R_{mc}} \cdot \cos \alpha_{we} \right) \right) + \arccos \left( \frac{R_{we}}{R_{mc}} \cdot \cos \alpha_{we} \right) + \\ & + \frac{\pi}{2 \cdot Z} - \frac{\varphi_{01}}{Z} + \operatorname{arc} \sin \frac{b_c}{2 \cdot R_{mc}} = 0 \end{aligned} \quad (14)$$

The determined radius vector  $R_{mc}$  derived from the nonlinear equation (14) through the numerical solution is used to calculate the eccentricity  $e$ , using expression (7).

The final expression for calculating the value of eccentricity  $e$ , at which the convexo-concave modified profile is closest to the involute profile, has the following form:



$$e = \frac{1}{2} \cdot \frac{-2 \cdot (R_{we} - 1,25 \cdot m) + \sqrt{4 \cdot R_{mc}^2 - b_c^2}}{1 + \cos\varphi_1} \quad (15)$$

Obtaining a numerical solution of equation (14) relatively  $R_{mc}$  is expedient to simplify by transforming equation (14) into a Taylor series in the vicinity of a point lying on the pitch circle of the gear wheel. The corresponding calculations were performed using the mathematical package of symbolic calculations "Maple". For a spur cylindrical gear with parameters  $m = 10$  mm;  $Z = 18$ ;  $\alpha_{we} = 20^0$ ; disk cutter:  $b_c = 5$  mm; angular velocity change device:  $k = 3$ , mm,  $l_1 = 72$  mm;  $e_r = 6$  mm; for the angle of rotation of the spindle of the gear milling machine  $\varphi_{01} = \frac{\pi}{2}$  based on equation (14), the Taylor series takes the following form:

$$0,419540086 - 0,004352874829 \cdot R_{mc} - 0,000166165366 \cdot (R_{mc} - R_{we})^2 + \\ + 0,6587848291 \cdot 10^{-5} \cdot (R_{mc} - R_{we})^3 - 0,43732413 \cdot 10^{-6} \cdot (R_{mc} - R_{we})^4 = 0$$

Using the previous expression and expression (15), we calculate the value of the radius-vector  $R_{mc} = 95.416$  mm for a point on the convexo-concave modified profile and the value of the eccentricity of the installation of the disk cutter on the tool holder -  $e = 12.22$  mm. A comparison of the teeth of a cylindrical gear wheel with convexo-concave modified and involute (standard) profiles is shown in Figure 3. In general, there is a practical coincidence of the profiles.

An important feature of the resulting convex-concave modified profile is that the wheel tooth is obtained with a flank. Flanked involute profile teeth, the production of which in practice is accompanied by significant technological difficulties, increase the smoothness of operation and durability of the cylindrical gear transmission, mainly at a significant wheel rotation frequency. Unlike involute flanked teeth, convexo-concave modified profiles on the teeth of cylindrical wheels are obtained by the CSTDC method in a technologically much simpler way using disk cutters of the general design. In addition, the proposed method for selecting technological and design parameters of tooling makes it possible to obtain teeth with a convex-concave modified profile,

satisfying the requirements for the size of the lateral clearance in cylindrical gear transmissions.

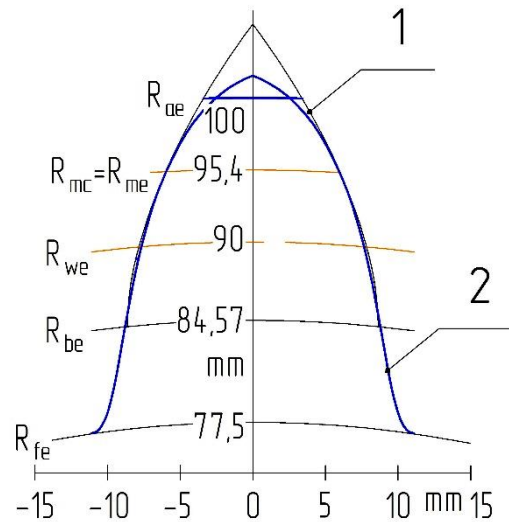


Figure 3. The tooth profile, obtained by continuous shaping with a disk cutter (involute profile (1), convexo-concave profile (2)).

Cutting of cylindrical gears can be carried out on a gear milling machine by the continuous shaping method of tooth profiles with non-profiled disk milling cutters (CSTDC).

Mathematical models have been developed that allow for reasonably establishing technological parameters for obtaining a convexo-concave modified profile of cylindrical gear teeth with improved performance characteristics concerning the smooth operation and contact of wheel teeth in cylindrical gear transmission.

## SECTION 12. TRANSPORT

DOI: 10.46299/ISG.2024.MONO.TECH.4.12.1

### 12.1 Математична модель мінімізації втрат пройденої відстані

Розглянемо складову  $\Delta S_1$  втрати пройденої відстані через різницю довжини програмної та реальної траєкторій, яка характеризується траєкторною похибкою.

Управління судном за вибраним маршрутом протягом рейсу є багат шаровою ієрархічною системою, яка містить кілька рівнів складності і рішення кожного вищого рівня параметризує завдання наступного нижнього рівня (рис. 1).

Шар найбільшої складності – третій, вирішує завдання вибору програмної траєкторії руху судна, враховуючи два основні аспекти цього завдання. По-перше, константи середовища на маршруті переходу (кордони навігаційних небезпек, ізобати тощо) та детерміновані процеси (течії, припливно-відливні явища) визначають формування попередньої програмної траєкторії на весь перехід судна, що відповідає вимогам безпеки та економічності.

По-друге, у процесі реалізації програмної траєкторії можуть виникати ситуаційні обурення, що породжуються навколишніми суднами, які небезпечно рухаються, що вимагає розрахунку безпечних фрагментів програмної траєкторії з метою безпечного розходження. Проте завдання компенсації ситуаційних збурень у цій роботі не розглядається. Отже, завданням третього шару є формування програмної траєкторії руху судна.

Отримане рішення завдання програмного руху судна є вихідним для другого шару, на якому відбувається компенсація навігаційних обурень, тобто, вирішується завдання провідки судна за заданою програмною траєкторією. З цією метою здійснюється контроль поточного місця судна, та формуються параметри руху (курс та швидкість судна) для його провідки за програмною траєкторією, причому системою навігаційної інформації вимірюються необхідні

навігаційні параметри і потім розраховуються коригуючі значення параметрів руху.

На першому шарі розв'язання задачі проводиться стабілізація значень курсу та швидкості судна. Розв'язанням цього завдання є значення обертів гвинта (заданої швидкості) та кута кладки пера руля.

Системи  $\vartheta_1$ ,  $\vartheta_2$  і  $C_t$  знаходяться на третьому шарі (рис. 1), з їх допомогою відбувається формування програмної траєкторії. Причому  $\vartheta_2$  – система знань про детерміновані процеси середовища,  $\vartheta_1$  – система знань про константи середовища на маршруті переходу,  $C_t$  – система, що вирішує і при необхідності коригує програмну траєкторію руху судна. Таким чином, зазначені системи вирішують задачу вибору вихідної траєкторії руху судна  $Tr_i$ .

Другий шар формують системи  $P_1$ ,  $P_{c1}$  та  $\vartheta_{c1}$ , які вирішують завдання провідки судна по заданій траєкторії. Призначення систем такі:

$P_1$  – система, яка здійснює прогноз траєкторії руху судна на ділянку  $Tr_{ni}$ ;

$P_{c1}$  – система, що стабілізує судно на траєкторії  $Tr_{ni}$ , розраховуючи поправки  $\Delta K$  і  $\Delta V$  з метою компенсації зносу судна;

$\vartheta_{c1}$  – інформаційна система, яка здійснює зворотні зв'язки та визначає поточні координати судна  $\varphi(t)$  та  $\lambda(t)$ .

Перший шар складається з систем  $P_{c2}$  і  $\vartheta_{c2}$ , і вирішують задачу стабілізації параметрів руху судна. Система  $\vartheta_{c2}$  є інформаційною та визначає поточні параметри руху судна, система  $P_{c2}$  є системою стабілізації судна за курсом та швидкістю та формує керуючі впливи: кут кладки пера руля  $\beta(t)$  та оберти двигуна  $n(t)$ .

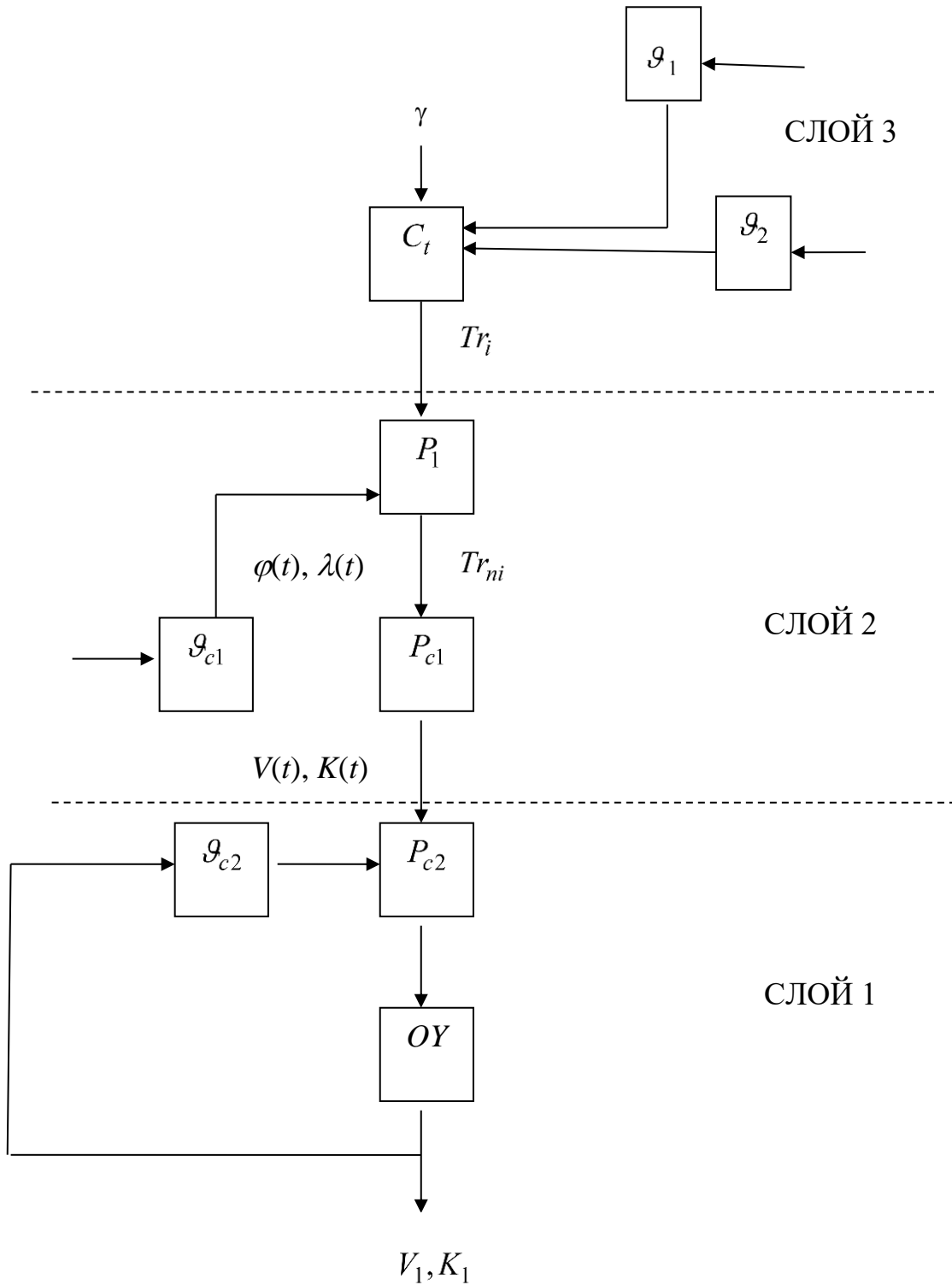


Рисунок 1. Багатошаровий опис системи керування судном

Усі три рівня розв'язання задачі функціонують у циклічному режимі, тільки періодичності циклів на кожному рівні є різними.

Так на першому рівні частота корекції програмної траєкторії, насамперед через зустріч з небезпечно рухомими цілями, є досить низькою, причому частота контролю навколишнього навігаційного стану з метою виявлення суден, що мають тенденцію до небезпечного зближення досить висока.

Частота визначення прирощень курсу чи швидкості  $\Delta K$  і  $\Delta V$  на другому рівні значно вища, а процес стабілізації параметрів руху судна практично безперервний.

Розглянемо вираз для дисперсії траєкторної похибки, враховуючи, що в умовах зовнішніх збурень застосовується спосіб коригувального водіння за обсерваціями [546], який ще називають способом постійного навігаційного режиму [547], тобто в дискретні моменти часу  $t$  (причому  $t$  приймає цілочисленні  $0, 1 \dots$ ) визначаються обсервовані координати судна. Інтервал між обсерваціями  $\Delta t$  можна вважати постійним і протягом цього інтервалу судно слідує з незмінними параметрами руху  $K$  і  $V$ .

У кожен момент часу  $t$  істинне положення судна характеризується вектором  $x(t)$  в системі координат  $O \Delta \phi_t \Delta w_t$ , початок якої знаходиться в програмній точці, що відповідає моменту часу  $t$ , а осі паралельні осям географічної системи координат (рис 2).

В результаті обсервації одержують оцінку  $\hat{x}(t)$  вектора  $x(t)$ . Отримана величина оцінки вектору  $\hat{x}(t)$  є оцінкою зносу судна, що накопичився до моменту часу  $t$ . Зазначений знос компенсується на момент часу  $t + 1$ , тобто за інтервал часу  $\Delta t$ , за допомогою вектору керуючих впливів судна  $u(t)$ . Причому вибір вектору  $u(t)$  проводиться таким чином, щоб запобігти появі зносу судна до моменту часу  $t + 1$ .

Тому вектор  $x(t + 1)$  в момент часу  $t + 1$  (істинних положень судна), тепер уже заданий в системі координат  $O \Delta \phi_{t+1} \Delta w_{t+1}$ , початок якої належить програмній траєкторії і знаходиться в точці, яка відповідає моменту часу  $t + 1$ , визначається лінійним різницеvim стохастичним рівнянням [548] (рис 2):

$$x(t + 1) = x(t) + \Gamma\{u(t), \Delta t\} + \Gamma\{z(t), \Delta t\}, \quad (1)$$

де  $\Gamma\{u(t), \Delta t\}$  – зміщення судна відносно програмної траєкторії за інтервал часу  $\Delta t$  в результаті прикладених керуючих впливів  $u(t)$

$\Gamma\{z(t), \Delta t\}$  – переносне переміщення судна відносно програмної траєкторії під впливом зовнішнього збурення  $z(t)$  за інтервал часу  $\Delta t$ .

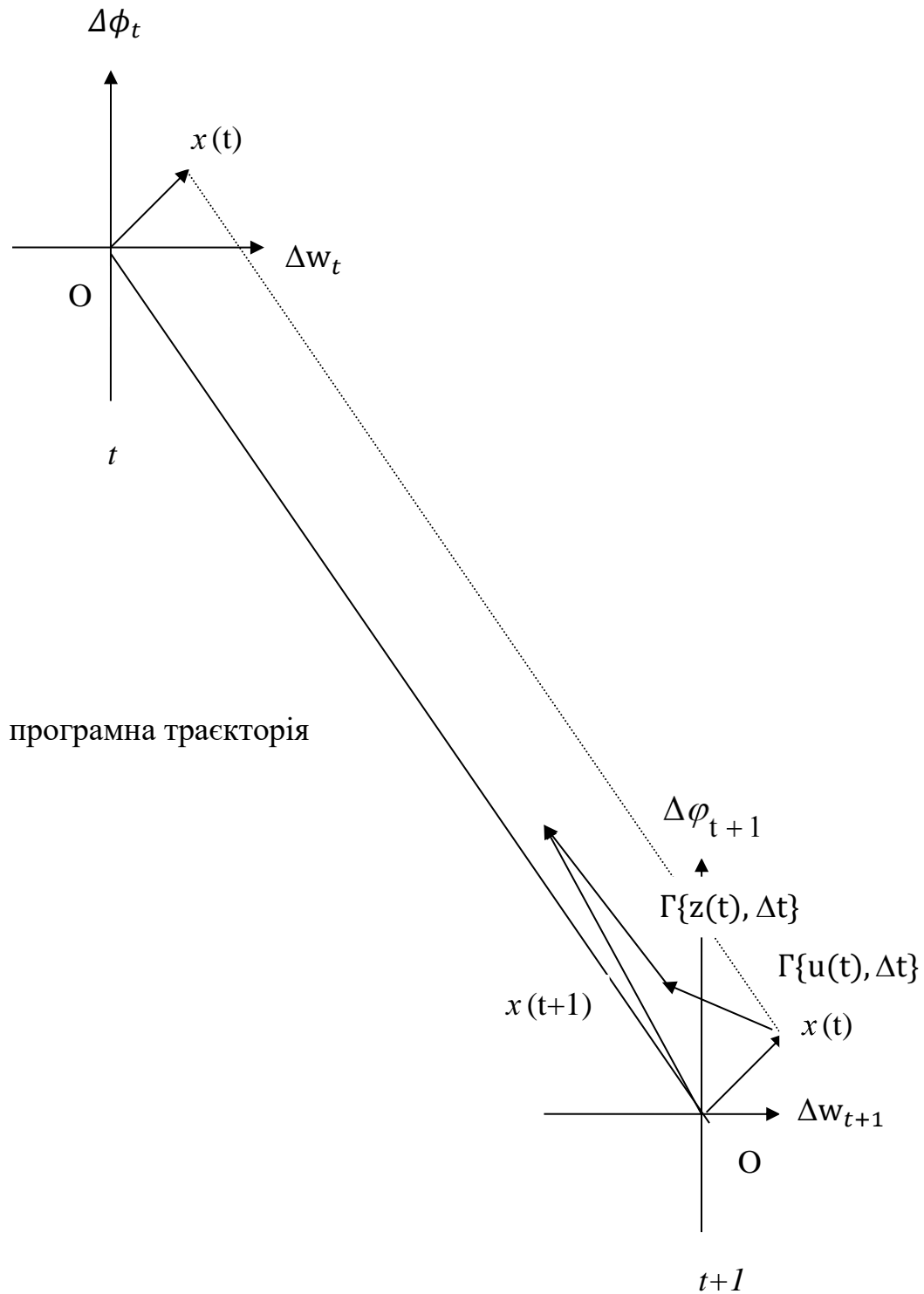


Рисунок 2. До складання різницевого стохастичного рівняння руху

Вочевидь, величина вектору  $x(t + 1)$  значною мірою визначається значенням  $\Gamma\{u(t), \Delta t\}$ , що є керованим, оскільки залежить від вектору керуючих впливів  $u(t)$ . Для забезпечення мінімального значення вектору  $x(t + 1)$  поступають наступним чином. Виходячи із значень величин  $V$ ,  $\Delta t$  і  $\hat{x}(t)$ , в момент часу  $t$  відбувається прогноз очікуваного значення вектору  $x(t + 1)$ , причому прогнозоване значення позначимо  $\bar{x}(t + 1)$ . Для прогнозу використовується вектор вимірів  $y(t)$ , за допомогою якого проводиться оцінка  $\hat{x}(t)$ . Очевидно, прогноз доцільно робити за наступною рекурентною формулою:

$$\bar{x}(t + 1) = \bar{x}(t) + \Gamma\{u(t), \Delta t\} + \Gamma\{\hat{z}(t), \Delta t\} + M_1 [y(t)],$$

де  $\bar{x}(t)$  – прогноз вектору  $x(t)$  на момент часу  $t$ , зроблений під час попередньої обсервації в момент часу  $(t - 1)$ ;

$M_1 [y(t)]$  – поправка до прогнозуючого стану  $\bar{x}(t)$  з урахуванням вектору вимірів  $y(t)$ , причому поправка визначається за допомогою алгоритму  $M_1$ , а в якості вихідних даних вибираються різниця між виміряними і прогнозованими значеннями вектору  $x(t)$ ;

$u(t)$  – оцінка величини діючого обурення.

Переміщення  $\Gamma\{u(t), \Delta t\}$  необхідно вибирати в такий спосіб, щоб величина прогнозу  $\bar{x}(t + 1)$  оберталась в 0, тобто відповідно до залежності:

$$\Gamma\{u(t), \Delta t\} = -\bar{x}(t) - \Gamma\{\hat{z}(t), \Delta t\} - M_1 [y(t)].$$

Якщо врахувати, що на попередньому інтервалі часу вибір переміщення  $\Gamma\{u(t - 1), \Delta t\}$  проводився, виходячи з вимоги обертання в 0 прогнозу  $\bar{x}(t)$ , то отримаємо наступну залежність:

$$\Gamma\{u(t), \Delta t\} = -\Gamma\{\hat{z}(t), \Delta t\} - M_1 [y(t)]$$

З отриманого виразу випливає, що  $M_1 [y(t)]$  є вектором перенесення в



системі координат  $O\Delta\phi_t\Delta w_t$  і, очевидно, оцінка  $\hat{x}(t)$  є величиною  $M_1[y(t)]$ , тобто  $\hat{x}(t) = M_1[y(t)]$  або:

$$\hat{x}(t) = x(t+1) + \chi_{M_1}(t), \quad (2)$$

де  $\chi_{M_1}(t)$  – похибка обсервації, яка також залежить від алгоритму  $M_1$ .

Отже, з урахуванням останньої залежності, переміщення судна  $\Gamma\{u(t), \Delta t\}$  може бути представлено наступним виразом:

$$\Gamma\{u(t), \Delta t\} = -\hat{x}(t) - \Gamma\{\hat{z}(t), \Delta t\}. \quad (3)$$

Очевидно, вихідне рівняння (1) можна записати у вигляді:

$$x(t+1) = x(t) + \Gamma\{u(t), \Delta t\} + \Gamma\{z(t), \Delta t\} + G\{h(t), \Delta t\},$$

де  $G\{h(t), \Delta t\}$  – зміщення судна, викликане похибками приладів числення, за інтервал часу  $\Delta t$ .

Підставляючи в останній вираз залежність (3), отримаємо:

$$x(t+1) = x(t) + \Gamma\{u(t), \Delta t\} + G\{h(t), \Delta t\} - \hat{x}(t) - \Gamma\{\hat{z}(t), \Delta t\}.$$

З урахуванням виразу (2) остання залежність набуває остаточного вигляду:

$$x(t+1) = \chi(t, \Delta t) + \upsilon(t, \Delta t) + \varepsilon(t, \Delta t),$$

де  $\chi(t, \Delta t) = \chi_{M_1}(t, \Delta t)$ ;

$\upsilon(t, \Delta t) = \Gamma\{z(t), \Delta t\} - \Gamma\{\hat{z}(t), \Delta t\}$  – похибка в обліку впливу зовнішнього збурення  $z(t)$ ;

$\varepsilon(t, \Delta t)$  – похибка, що виникає через похибки приладів числення, причому  $\varepsilon(t, \Delta t) = G\{h(t), \Delta t\}$ .

Вищевикладене проілюструємо за допомогою рис. 3. У момент часу  $t$  істинне місце судна визначалося б точкою  $M_0$  (кінець вектору  $x(t)$ ). До моменту часу  $t + 1$ , якби прогноз значення обурення збігся з його дійсним значенням, то судно виявилось б у точці  $M_2$ , вважаючи, що похибки у показаннях приладів числення відсутні. При цьому вектор  $x(t + 1)$  дорівнював би тільки похибки обсервації  $\chi(t)$ .

Оскільки прогнозоване переміщення судна під впливом зовнішніх збурень відрізняється від дійсного на величину  $\nu(t, \Delta t)$ , то за відсутності похибок приладів числення судно було б у точці  $M_3$ , а вектор  $x(t + 1)$  визначився б сумою похибок  $\chi(t)$  і  $\nu(t, \Delta t)$ .

Наявність похибки приладів числення  $\varepsilon(t, \Delta t)$  визначає місце судна в точці  $M_4$ , при цьому вектор  $x(t + 1)$  є сумою всіх трьох похибок  $\chi(t)$ ,  $\nu(t, \Delta t)$  і  $\varepsilon(t, \Delta t)$ . Тому, вектор  $x(t)$  є випадковою двовимірною величиною, яку називатимемо похибкою траекторного управління, або просто траекторною похибкою, а послідовність значень  $x(t)$  у часі є випадковим процесом з дискретним часом [548], який описує рух судна щодо програмної траекторії.

Причому  $x(t)$  є випадковим процесом, утвореним сумою трьох двовимірних процесів  $\chi(t)$ ,  $\nu(t, \Delta t)$  і  $\varepsilon(t, \Delta t)$ .

Так як основною характеристикою керованого руху судна є траекторна похибка, то оцінкою якості керування судном можна вибрати коваріаційну матрицю траекторної похибки, яку позначимо  $R(t + 1)$ , а її вираз має наступний вигляд, з урахуванням того, що всі три складові процесу незалежні:

$$R(t + 1) = E\{x(t + 1)x(t + 1)^T\} = K(t) + R_\nu(t, \Delta t) + R_\varepsilon(t, \Delta t),$$

де  $K(t)$ ,  $R_\nu(t, \Delta t)$ ,  $R_\varepsilon(t, \Delta t)$  – коваріаційні матриці відповідно похибок обсервації  $\chi(t)$ , обліку впливу зовнішніх збурень  $\nu(t, \Delta t)$  та приладів числення  $\varepsilon(t, \Delta t)$ .

Отже, можна вважати, що якість реалізації судном програмної траєкторії тим вища, чим менше елементи коваріаційної матриці  $R(t)$  траєкторією похибки.

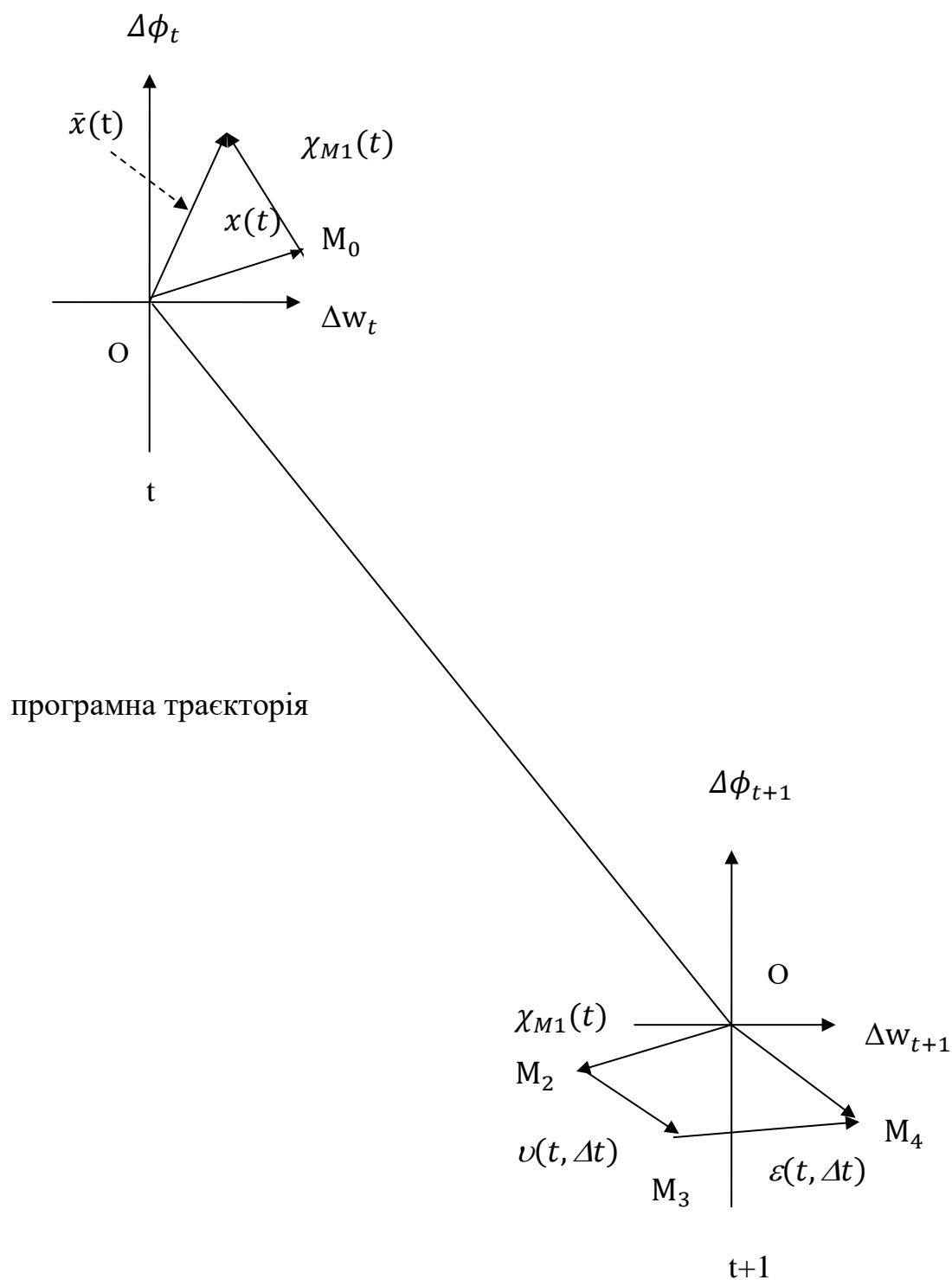


Рисунок 3. Формування траєкторної похибки керування судном

Так як коваріаційна матриця  $R(t)$  є сумою коваріаційних матриць похибки обсервації  $K(t)$ , похибки обліку зовнішніх збурень  $R_v(t, \Delta t)$  та похибки приладів числення  $R_e(t, \Delta t)$ , то необхідно ретельне вивчення факторів, що впливають на величину елементів кожної з розглянутих матриць та пошуку можливих шляхів формування необхідних значень факторів.

Розглянемо підступну матрицю похибок обсервації  $K(t)$ . Як відомо [549], обсервація полягає в отриманні оцінки істинних координат судна шляхом вимірювання параметрів навігаційних опорних навігаційних точок [550] штучного або природного походження, координати яких відомі.

Застосовуючи метод ліній положення, обсервоване місце судна визначається за допомогою апарату аналітичної геометрії як точка перетину двох та більше ліній положення. Наявність неминучих випадкових похибок у значеннях вимірюваних параметрів ставить завдання визначення ефективних обсервованих координат, точність яких як раз і характеризується коваріаційною матрицею  $K(t)$ .

Таким чином, вихідним для обсервації є вектор вимірювань навігаційних параметрів  $y(t)$  і закон розподілу ймовірностей вектору його похибок  $e(t)$ .

Щільність розподілу є багатовимірною та визначається розмірністю вектору  $y(t)$ . Допустимо  $y(t)$  є  $n$ -мірним вектором вимірювань, тоді вектор  $e(t)$  описується  $n$ -мірною спільною щільністю розподілу, яку позначимо  $g^*(t)$ .

Якщо складові, – похибки вимірювань навігаційних параметрів, – вектору  $e(t)$  позначити  $\zeta_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ), то спільна щільність має вигляд  $g^*(t, \zeta_1, \zeta_2, \dots, \zeta_i)$  [551].

Метод ліній положення перетворює вектор вимірювань навігаційних параметрів  $y(t)$  у вектор переносів  $c(t)$  за такою формулою [552]:

$$c(t) = \|[y_i(t) - y_{ci}(t)] / g_i\|,$$

де  $y_{ci}(t)$  – злічуване значення вимірюваного  $i$ -го навігаційного параметра  $y_i(t)$ ;

$g_{i i}$  – його градієнт.

Відповідно і вектор похибок  $e(t)$  перетворюється на вектор похибок  $b(t)$ :

$$b(t) = \|\zeta_i / g_i\| = \|\xi_i\|,$$

де  $\zeta_i$  – похибка і-ї лінії положення.

Спільна  $n$  - мірна щільність розподілу  $g^*(t, \zeta_1, \zeta_2 \dots \zeta_i)$  перетворюється на вигляд  $\tilde{g}(t, \xi_1, \xi_2 \dots \xi_i)$ .

Вектор перенесення  $c(t)$  пов'язаний з істинними координатами судна  $x(t)$  заданими в тій же системі координат, що і  $c(t)$ , наступним співвідношенням, наведеним в [553]:

$$c(t) = \theta_1 x(t) + b(t),$$

де

$$c(t) = \left\| \begin{array}{c} r_1(t) \\ r_2(t) \\ \dots \\ r_n(t) \end{array} \right\|; c(t) = \left\| \begin{array}{cc} \cos\alpha_1 & \sin\alpha_1 \\ \cos\alpha_2 & \sin\alpha_2 \\ & \dots \\ \cos\alpha_n & \sin\alpha_n \end{array} \right\|; b(t) = \left\| \begin{array}{c} \xi_1 \\ \xi_2 \\ \dots \\ \xi_n \end{array} \right\|,$$

тут  $r_i(t)$  – перенесення і-ї лінії положення;

$\alpha_i$  – напрям градієнта  $g_i$  і-го навігаційного параметра відносно меридіана в точці, що злічується.

Для визначення ефективності обсервованих координат  $\hat{x}(t)$ , причому  $\hat{x}(t) = \|\Delta\hat{\varphi}, \Delta\hat{w}\|$ , застосовується метод максимальної правдоподібності [554], який при розподілі похибок за законом Гауса трансформується в метод найменших квадратів або метод найменшої квадратичної форми (для випадків незалежних та залежних вимірів відповідно) [553].

Розглянемо загальний випадок довільного розподілу похибок вимірів. Оцінка ефективності обсервованих координат можлива за умови незалежності похибок вимірювань  $\xi_i$ , коли спільна щільність розподілу  $\tilde{g}(t, \xi_1, \xi_2 \dots \xi_i)$  може

бути представлена у вигляді добутку часток щільностей розподілу кожної похибки. У разі залежних похибок  $\xi_i$  їх можна замінити еквівалентним вектором тієї ж розмірності незалежних випадкових величин, що мають таку ж спільну щільність розподілу, як і  $b(t)$  [555].

Припустимо, що вектор  $b(t)$  є вектором незалежних похибок із частками щільностей розподілу  $f_i(\xi_i, \mu_i)$ , де  $\mu_i$  – параметри розподілу. Звертаємо увагу на ту обставину, що щільність розподілу  $f_i(\xi_i, \mu_i)$ , похибки лінії положення  $\xi_i$  однозначно визначається щільністю розподілу  $\psi_i(\zeta_i, h_i)$  похибки вимірювання навігаційного параметра  $\zeta_i$ . Якщо врахувати, що значення градієнта  $g_i$  у злічуваній точці постійно, то згідно [555]:

$$f_i(\xi_i, \mu_i) = |g_i| \psi_i(g_i, \zeta_i, h_i). \quad (4)$$

Не зупиняючись на процедурі пошуку ефективних обсервованих координат  $\hat{x}(t)$  методом максимальної правдоподібності, звернемо увагу на отримання коваріаційної матриці  $K(t)$ , що характеризує їх точність. При цьому слідуватимемо ідеї, викладеної в [555].

Для даного випадку похибка  $\xi_i$  має вигляд:

$$\xi_i = r_i(t) - \Delta\varphi \cos \alpha_i - \Delta w \sin \alpha_i.$$

Тому логарифм функції правдоподібності, що позначається  $\Phi_n[c(t), x(t)]$  визначається виразом:

$$\Phi_n[c(t), x(t)] = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln f_i(t, r_i(t) - \Delta\varphi \cos \alpha_i - \Delta w \sin \alpha_i, \mu_i)$$

З метою зручності запису опустимо у формулах  $t$  і  $\mu_i$ , маючи на увазі їх наявність, тому:

$$\Phi_n[c(t), x(t)] = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln f_i(r_i(t) - \Delta\varphi \cos \alpha_i - \Delta w \sin \alpha_i, \mu_i).$$

Припускаємо, що функція  $f_i$  досить гладка і має першу та другу похідні за змінними  $\Delta\varphi$  і  $\Delta w$ . У цьому випадку коваріаційна матриця визначається з виразу [555]:

$$K(\Delta\varphi, \Delta w) = D^{-1}/n,$$

де

$$D = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \int_{R_1} A_i(r_i(t), \Delta\varphi, \Delta w) A_i^T(r_i(t), \Delta\varphi, \Delta w) \times f_i(r_i(t) - \Delta\varphi \cos \alpha_i - \Delta w \sin \alpha_i)$$

Вектор  $A_i(r_i(t), \Delta\varphi, \Delta w)$  знаходиться за формулою:

$$A_i(r_i(t), \Delta\varphi, \Delta w) = \left\| \begin{array}{l} \frac{\partial}{\partial \Delta\varphi} \ln [f_i(r_i(t) - \Delta\varphi \cos \alpha_i - \Delta w \sin \alpha_i)] \\ \frac{\partial}{\partial \Delta w} \ln [f_i(r_i(t) - \Delta\varphi \cos \alpha_i - \Delta w \sin \alpha_i)] \end{array} \right\|.$$

За правилами диференціювання складної функції отримаємо:

$$\frac{\partial}{\partial \Delta\varphi} \ln [f_i(r_i(t) - \Delta\varphi \cos \alpha_i - \Delta w \sin \alpha_i)] = -\cos \alpha_i \frac{\partial}{\partial \xi_i} [f_i(\xi_i)] / f_i(\xi_i),$$

пам'ятаючи, що  $r_i(t) - \Delta\varphi \cos \alpha_i - \Delta w \sin \alpha_i = \xi_i$ .

Аналогічно:

$$\frac{\partial}{\partial \Delta w} \ln [f_i(r_i(t) - \Delta\varphi \cos \alpha_i - \Delta w \sin \alpha_i)] = -\sin \alpha_i \frac{\partial}{\partial \xi_i} [f_i(\xi_i)] / f_i(\xi_i).$$

Отже, можна записати:

$$A_i(r_i(t), \Delta\varphi, \Delta w) = \left\| \begin{array}{l} \cos \alpha_i \\ \sin \alpha_i \end{array} \right\| \frac{\partial}{\partial \xi_i} [f_i(\xi_i)] / f_i(\xi_i),$$

а відповідна транспонована матриця  $A_i^T(r_i(t), \Delta\varphi, \Delta w)$  має вигляд:

$$A_i^T(r_i(t), \Delta\varphi, \Delta w) = -\|\cos \alpha_i \sin \alpha_i\| \frac{\partial}{\partial \xi_i} \left[ f_i(\xi_i) \right] / f_i(\xi_i).$$

Тому добуток матриць  $A_i(r_i(t), \Delta\varphi, \Delta w) \times A_i^T(r_i(t), \Delta\varphi, \Delta w)$  з урахуванням отриманих виразів набуває такого вигляду:

$$\begin{aligned} & A_i(r_i(t), \Delta\varphi, \Delta w) \times A_i^T(r_i(t), \Delta\varphi, \Delta w) = \\ & = \left\{ \frac{\partial}{\partial \xi_i} \left[ f_i(\xi_i) \right] / f_i(\xi_i) \right\}^2 \left\| \begin{array}{cc} \cos^2 \alpha_i & \sin \alpha_i \cos \alpha_i \\ \sin \alpha_i \cos \alpha_i & \sin^2 \alpha_i \end{array} \right\| \end{aligned}$$

Знайдемо математичне очікування від отриманого виразу:

$$\begin{aligned} & \int_{R_1} A_i(r_i(t), \Delta\varphi, \Delta w) A_i^T(r_i(t), \Delta\varphi, \Delta w) \times f_i(r_i(t) - \Delta\varphi \cos \alpha_i - \\ & \quad - \Delta w \sin \alpha_i) = \\ & = \int_{R_1} A_i(r_i(t), \Delta\varphi, \Delta w) A_i^T(r_i(t), \Delta\varphi, \Delta w) \times f_i(\xi_i) d\xi_i = \\ & = \left\| \begin{array}{cc} \cos^2 \alpha_i & \sin \alpha_i \cos \alpha_i \\ \sin \alpha_i \cos \alpha_i & \sin^2 \alpha_i \end{array} \right\| \int_{R_1} \left\{ \frac{\partial}{\partial \xi_i} \left[ f_i(\xi_i) \right] / f_i(\xi_i) \right\}^2 f_i(\xi_i) d\xi_i. \end{aligned}$$

Враховуючи, що  $f_i(\xi_i) = f_i(\xi_i, \mu_i)$  вводимо позначення:

$$\int_{R_1} \left\{ \frac{\partial}{\partial \xi_i} \left[ f_i(\xi_i) \right] / f_i(\xi_i) \right\}^2 f_i(\xi_i) d\xi_i = \rho(\mu_i),$$

причому аналітичний вид функції  $\rho$  однозначно визначається типом щільності розподілу  $f_i$ .

З урахуванням вищевикладеного, матриця  $D$  набуває вигляду:



$$D = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left\| \begin{array}{cc} \cos^2 \alpha_i & \sin \alpha_i \cos \alpha_i \\ \sin \alpha_i \cos \alpha_i & \sin^2 \alpha_i \end{array} \right\| \rho(\mu_i) =$$

$$= \frac{1}{n} \left\| \begin{array}{cc} \sum_{i=1}^n \cos^2 \alpha_i \rho(\mu_i) & \sum_{i=1}^n \sin \alpha_i \cos \alpha_i \rho(\mu_i) \\ \sum_{i=1}^n \sin \alpha_i \cos \alpha_i \rho(\mu_i) & \sum_{i=1}^n \sin^2 \alpha_i \rho(\mu_i) \end{array} \right\|.$$

Тепер можна знайти коваріаційну матрицю  $K(\Delta\varphi, \Delta w)$ , використовуючи раніше отримані вирази:

$$K(\Delta\varphi, \Delta w) = \frac{1}{\Delta n^2} \left\| \begin{array}{cc} \sum_{i=1}^n \cos^2 \alpha_i \rho(\mu_i) & - \sum_{i=1}^n \sin \alpha_i \cos \alpha_i \rho(\mu_i) \\ - \sum_{i=1}^n \sin \alpha_i \cos \alpha_i \rho(\mu_i) & \sum_{i=1}^n \sin^2 \alpha_i \rho(\mu_i) \end{array} \right\|,$$

де  $\Delta$  – визначник матриці  $D$ , який дорівнює:

$$\Delta = \frac{1}{n^2} \{ \sum_{i=1}^n \cos^2 \alpha_i \rho(\mu_i) \sum_{i=1}^n \sin^2 \alpha_i \rho(\mu_i) - [\sum_{i=1}^n \sin \alpha_i \cos \alpha_i \rho(\mu_i)]^2 \}.$$

З урахуванням виразу (4) отримаємо остаточний вираз для коваріаційної матриці  $K(\Delta\varphi, \Delta w)$ :

$$K(\Delta\varphi, \Delta w) = \left\{ \sum_{i=1}^n \cos^2 \alpha_i \rho(\mu_i) \sum_{i=1}^n \sin^2 \alpha_i \rho(\mu_i) - \left[ \sum_{i=1}^n \sin \alpha_i \cos \alpha_i \rho(\mu_i) \right]^2 \right\}^{-1} \times$$

$$\times \left\| \begin{array}{cc} \sum_{i=1}^n \cos^2 \alpha_i \rho(\mu_i) & - \sum_{i=1}^n \sin \alpha_i \cos \alpha_i \rho(\mu_i) \\ - \sum_{i=1}^n \sin \alpha_i \cos \alpha_i \rho(\mu_i) & \sum_{i=1}^n \sin^2 \alpha_i \rho(\mu_i) \end{array} \right\|, \quad (5)$$

де  $\hat{\mu}_i = g_i \mu_i$ .

Аналіз отриманого виразу (5) дозволяє зробити висновок про те, що коваріаційна матриця обсервації  $K(\Delta\varphi, \Delta w)$ . Аналіз отриманого виразу (5) дозволяє зробити висновок про те, що коваріаційна матриця обсервації  $n$ , типом щільності розподілу  $f_i$  похибок навігаційних вимірювань та її параметрами  $\mu_i$ , а

також залежить від модулів  $g_{i_i}$  та напрямків  $\alpha_i$  градієнтів навігаційних параметрів у точці, що злічується.

Як раніше зазначали, отримання коваріаційній матриці  $K(t)$  вектора вимірювань навігаційних параметрів  $y(t)$  передбачає застосування методу максимальної правдоподібності, який забезпечує мінімальну матрицю  $K(t)$  за умови, що істинна щільність розподілу похибок  $f(\xi)$  збігається з використовуваною для оцінки щільністю  $\phi(\xi)$  [555]. У судноводінні прийнято гіпотезу про нормальний розподіл похибок вимірювань, хоча останнім часом виникли передумови для застосування альтернативних розподілів.

Якщо істинна щільність розподілу  $f(\xi)$  відрізняється від розподілу Гаусса, то коваріаційна матриця, яка отримана методом найменшої квадратичної форми буде перевищувати її мінімально можливе значення.

В роботі [556] розглянуто два змішані закони розподілу ймовірностей, щільності яких мають наступний аналітичний вигляд:

$$f_1(\xi) = \frac{A_m}{(\xi^2/2+\lambda)^{m+1}}; \quad f_2(\xi) = \frac{A_m^*}{(\xi^2/2+\lambda)^{m+3/2}},$$

де  $A_m$  і  $A_m^*$  – нормуючі множники;

$m$  – суттєвий параметр, що приймає цілочисленне значення;

$\lambda$  – масштабний параметр.

У цій же роботі були знайдені вирази для ефективності оцінок вимірювань при використанні методу найменших квадратів за умови розподілу похибок за згаданими законами, причому ефективності позначені через  $e_1$  і  $e_2$  та мають такий аналітичний вираз:

$$e_1 = 1 - \frac{3}{2m^2+3m+1}; \quad e_2 = 1 - \frac{3}{2m^2+5m+3}.$$

У цьому випадку коваріаційна матриця обсервації збільшується в  $e^{-1}$  раз в порівнянні з мінімально можливою. В обох випадках ефективність  $e$  зростає із зростанням суттєвого параметра  $m$ , як показано в табл. 1.

Таким чином, коваріаційна матриця обсервації  $K(\Delta\varphi, \Delta w)$  залежить від відповідності справжнього закону розподілу похибок вимірювань передбачуваному.

Як раніше було показано, коваріаційна матриця траєкторією похибки  $R(t+1)$  крім коваріаційної матриці обсервації  $K(t)$  залежить також від коваріаційної матриці  $R_v(t, \Delta t)$  похибок обліку зовнішніх збурень і коваріаційної матриці  $R_e(t, \Delta t)$  похибок приборів числення.

Таблиця 1

Ефективність квазіправдоподібних оцінок

$m$	1	2	3	4	5	6	7	10
$e_1$	0,500	0,800	0,893	0,933	0,955	0,967	0,975	0,978
$e_2$	0,700	0,857	0,917	0,945	0,962	0,971	0,978	0,988

Основною особливістю зазначених матриць є залежність їх елементів від інтервалу часу  $\Delta t$  між обсерваціями. Тому обидві похибки можна поєднати в одну  $\eta(t, \Delta t)$  з коваріаційною матрицею  $R_n(t, \Delta t) = R_v(t, \Delta t) + R_e(t, \Delta t)$ .

Складові похибки числення  $\Delta\varphi$  і  $\Delta w$  визначаються за формулами:

$$\begin{aligned}\delta\varphi &= \delta V \Delta t \cos(K + \delta K) = \delta V \Delta t \cos(K) - \delta K \delta V \Delta t \sin(K) \\ \delta w &= \delta V \Delta t \sin(K + \delta K) = \delta V \Delta t \sin(K) - \delta K \delta V \Delta t \cos(K),\end{aligned}\quad (6)$$

де  $\delta K$  і  $\delta V$  – похибки у прогнозі курсу та швидкості судна, що включають похибки приладів числення та оцінки зовнішніх збурень.

Отже, коваріаційні матриці обсервації  $K(t)$  і  $R_n(t, \Delta t)$  залежать від точності приладів системи навігаційної інформації, як впливає з виразів (5) та (6).

Очевидно, що ймовірність визначення навігаційних параметрів системою навігаційної інформації залежить від експлуатаційної надійності її приладів, тому коваріаційна матриця траєкторної похибки  $R(t)$  також є функцією експлуатаційної надійності системи навігаційної інформації.

Зазначимо, що коваріаційна матриця  $R(t)$  траєкторної похибки  $\eta = x(t) \eta$ , як двовимірної величини, може бути позначена  $R(x, y)$  і виражається через центральні та змішані моменти другого порядку наступним чином:

$$R(x, y) = \begin{vmatrix} D_x & D_{xy} \\ D_{yx} & D_y \end{vmatrix}, \quad (7)$$

Для виключення недіагонального елемента  $D_{xy} = D_{yx}$  коваріаційної матриці  $R(x, y)$  при відомих елементах  $D_x$ ,  $D_y$  і  $D_{xy}$ , необхідно розрахувати кут повороту  $\gamma$ , який визначається умовою [551]:

$$\operatorname{tg} 2\gamma = \frac{2D_{xy}}{D_x - D_y}.$$

При повороті на цей кут змінюються значення дисперсій  $D_x$  та  $D_y$ , що характеризують діагональну коваріаційну матрицю, яку позначимо  $R(x, y)_1$ , нові значення дисперсій позначені  $D_{x1}$  і  $D_{y1}$ , тобто:

$$R(x, y)_1 = \begin{vmatrix} D_{x1} & 0 \\ 0 & D_{y1} \end{vmatrix}. \quad (8)$$

Матриця  $R(x, y)_1$ , а отже і її елементи  $D_{x1}$  і  $D_{y1}$  визначаються за допомогою співвідношення [554]:

$$R(x, y)_1 = GR(x, y)G^T,$$

де  $G$  – матриця перетворення, елементи якої, як показано в [554], визначаються наступними формулами:

$$g_{11} = g_{22} = \left\{ \frac{1}{2} \left[ 1 + \frac{(D_x - D_y)}{\sqrt{4D_{xy}^2 + (D_x - D_y)^2}} \right] \right\}^{1/2},$$

$$g_{21} = -g_{12} = \left\{ \frac{1}{2} \left[ 1 - \frac{(D_x - D_y)}{\sqrt{4D_{xy}^2 + (D_x - D_y)^2}} \right] \right\}^{1/2}.$$

Нові значення дисперсій розраховуються за формулами:

$$D_{x1} = \frac{1}{2} [D_x + D_y + \sqrt{4D_{xy}^2 + (D_x - D_y)^2}];$$

$$D_{y1} = \frac{1}{2} [D_x + D_y - \sqrt{4D_{xy}^2 + (D_x - D_y)^2}]. \quad (9)$$

Отриманий вираз коваріаційної матриці характеризує випадкову траєкторну похибку  $\eta$  при русі судна на прямолінійних ділянках програмної траєкторії. Крім випадкової траєкторної похибки на прямолінійних ділянках програмної траєкторії руху судна через нищпорення судна виникає його бічне зміщення, величина якого носить детермінований характер і визначається якістю утримання судна на заданому курсі. Тому має враховуватися максимальне значення бічного зсуення.

При поворотах судна з однієї програмної ділянки на іншу, коли судно слідує криволінійною траєкторією, виникає похибка повороту  $\xi$  через відмінність прогнозованої траєкторії повороту від реальної, яка характеризується коваріаційною матрицею  $R(x,y)_\xi$ .

Однак оперувати коваріаційними матрицями незручно, бажано, щоб показник траєкторної похибки виражався скалярною характеристикою.

Для вибору скалярного показника звертаємо увагу на те, що в діагональній коваріаційній матриці  $R(x,y)_1$  (5) значення діагональних елементів  $D_{x1}$  і  $D_{y1}$  є

дисперсіями складових двовимірної векторіальної траєкторної похибки  $\eta$  по ортогональних осях. Отже, сума цих дисперсій є дисперсією модуля векторіальної траєкторної похибки  $D_1$ , тобто  $D_1 = D_{x1} + D_{y1}$ .

Якщо траєкторна похибка характеризується коваріаційною матрицею  $R(x,y)$ , другі змішані моменти якої не дорівнюють нулю, то сума дисперсій  $D_x$  та  $D_y$ , що є її діагональними елементами, також дорівнює дисперсії модуля векторної траєкторної похибки  $D_1$ . Інакше кажучи,  $D_1 = D_{x1} + D_{y1} = D_x + D_y$ .

Справедливість цього твердження випливає з виразів (9). Дійсно, скористаємося формулами для  $D_{x1}$  і  $D_{y1}$ , в результаті чого отримаємо:

$$D_{x1} + D_{y1} = \frac{1}{2}[D_x + D_y + \sqrt{4D_{xy}^2 + (D_x - D_y)^2}] + \frac{1}{2}[D_x + D_y - \sqrt{4D_{xy}^2 + (D_x - D_y)^2}] = D_x + D_y.$$

Отже, скалярною характеристикою коваріаційної матриці  $R(x,y)$ , незалежно від величини її других змішаних моментів, є дисперсія модуля векторної траєкторної похибки  $\eta$ , тобто  $D = D_x + D_y$ .

Вочевидь, аналогічне твердження справедливе й у коваріаційної матриці  $R(x,y)_\xi$  векторіальної похибки повороту  $\xi$ , та її скалярною характеристикою є дисперсія модуля похибки  $\xi$  тобто  $D_\xi = D_{\xi x} + D_{\xi y}$ .

Таким чином, стохастичними скалярними характеристиками якості реалізації програмної траєкторії руху судна є величина  $D$  на прямолінійних ділянках траєкторії і величина  $D_\xi$  – на ділянках повороту. Тому в якості стохастичного показника  $Q_s$  векторіальної траєкторної похибки доцільно вибрати суму дисперсій модулів векторіальних похибок  $\eta$  і  $\xi$ , тобто:

$$Q_s = D + fD_\xi, \quad (10)$$

де  $f$  – коефіцієнт, менше 1 і враховує співвідношення частот обсервації та поворотів судна.

Векторіальну похибку  $\eta$  можна подати сумою двох похибок: похибки обсервації  $\chi(t)$  та похибки прогнозу програмних координат  $\theta$  за інтервал часу  $\Delta t$ . Причому похибка прогнозу  $\theta$ , у свою чергу, є сумою похибок обліку впливу зовнішніх збурень  $\upsilon(t, \Delta t)$  та приладів числення  $\varepsilon(t, \Delta t)$ . Отже:

$$D = D_{\chi} + D_{\theta},$$

а стохастичний показник:

$$Q_s = D_{\chi} + D_{\theta} + fD_{\xi}.$$

Таким чином, показник  $Q_s$  у скалярному вираженні відображає точність обсервації, прогнозу та управління судном при повороті, тобто. показники системи інформації  $C_I$  та системи управління судном  $C_C$ .

Покажемо, що обраний стохастичний показник ефективності  $Q_s$ , також содержит характеристики також містить властивості системи забезпечення структурної стійкості  $C_R$ , показники надійності одержання дисперсій  $D_{\chi}$ ,  $D_{\theta}$  та  $D_{\xi}$ . Зазначимо, що система інформації  $C_I$  містить альтернативні джерела отримання обсервованих координат судна з різною точністю та ймовірністю їх отримання. Припустимо, в системі інформації для отримання обсервованих координат можна використовувати супутникову систему GPS, точність якої  $D_G$  і коефіцієнт готовності  $K_{GG}$ , який характеризує можливість справної роботи приймача в будь-який момент часу. Другим альтернативним джерелом отримання обсервованих координат є РЛС з дисперсією  $D_R$  та коефіцієнтом готовності  $K_{GR}$ .

Також обсервоване місце судна можна отримати за допомогою гірокомпасу, який забезпечує обсервацію з дисперсією  $D_{GK}$  та коефіцієнтом

готовності  $K_{ГГК}$ . Вочевидь, має місце співвідношення між точностями зазначених систем  $D_G < D_R < D_{ГК}$ . Тому найбільш бажана обсервація з точністю  $D_G$ , у разі неможливості отримати обсервацію по GPS використовується РЛС з точністю  $D_R$ . Обсервація з точністю  $D_{ГК}$  відбувається у разі відсутності можливості визначитися з GPS та РЛС. Зазначений алгоритм використання приладів системи інформації для визначення місця судна встановлює таке відношення переваги:

$$\text{GPS} > \text{РЛС} > \text{ГК}. \quad (11)$$

Сукупність приладів, призначених для отримання обсервованих координат, (у нашому випадку GPS, РЛС та ГК) можна розглядати як систему обсервації  $S_{ob}$ , що є підсистемою системи навігаційної інформації  $C_I$ . Кожен із приладів системи  $S_{ob}$  може бути в одному з двох станів: справному чи відмови, тому з погляду працездатності система обсервації характеризується безліччю станів, число яких  $N$  дорівнює  $2^m$  ( $m$  – число приладів у системі). В нашому випадку  $m = 3$  і, отже,  $N=8$ . Позначимо безліч станів системи обсервації  $S_{ob}$  через  $M_Z = \{Z_i\}$  ( $i=1 \div 8$ ). Якщо позначити справний стан приладу через 1, а стан відмови – через 0, то стан  $Z_i$  системи обсервації  $S_{ob}$  представимо в табл. 2.

Останній рядок в таблиці містить інформацію про точність системи обсервації в кожному із станів з урахуванням прийнятого відношення переваги (11).

Таблиця 2.

Перелік станів системи обсервації

$Z_i$	$Z_1$	$Z_2$	$Z_3$	$Z_4$	$Z_5$	$Z_6$	$Z_7$	$Z_8$
GPS	1	1	1	1	0	0	0	0
РЛС	1	0	1	0	1	1	0	0
ГК	1	1	0	0	1	0	1	0
$D_{ГК}$	$D_G$	$D_G$	$D_G$	$D_G$	$D_R$	$D_G$	$D_{ГК}$	-



Враховуємо, що ймовірність знаходження  $i$ -го приладу системи  $S_{ob}$  у справному стані  $P_i(1) = K_{\Gamma i}$ , а ймовірність того, що прилад перебуває у стані відмови –  $P_i(0) = 1 - K_{\Gamma i}$ . З урахуванням цього зауваження ймовірності перебування системи обсервації у стані  $Z_i$ , які позначимо  $P(Z_i)$ , наведені у табл. 3.

Неважко переконається, що  $\sum_{i=1}^8 P(Z_i) = 1$ , оскільки  $K_{\Gamma i} \leq 1$ . Очевидно, що дисперсія модуля векторної похибки обсервації  $D_\chi$  з урахуванням структури системи обсервації  $S_{ob}$  виражається наступним чином:

$$D_\chi = D_G P_G + D_R P_R + D_{GK} P_{GK}, \quad (12)$$

де  $P_G, P_R, P_{GK}$  – ймовірності використання для обсервації відповідно GPS, РЛС та ГК з урахуванням відношення переваги.

Таблиця 3.

Значення ймовірностей  $P(Z_i)$

$Z_i$	GPS	РЛС	ГК	$P(Z_i)$
$Z_1$	1	1	1	$P(Z_1) = K_{\Gamma G} K_{\Gamma R} K_{\Gamma GK}$
$Z_2$	1	0	1	$P(Z_2) = K_{\Gamma G} (1 - K_{\Gamma R}) K_{\Gamma GK}$
$Z_3$	1	1	0	$P(Z_3) = K_{\Gamma G} K_{\Gamma R} (1 - K_{\Gamma GK})$
$Z_4$	1	0	0	$P(Z_4) = K_{\Gamma G} (1 - K_{\Gamma R}) (1 - K_{\Gamma GK})$
$Z_5$	0	1	1	$P(Z_5) = (1 - K_{\Gamma G}) K_{\Gamma R} K_{\Gamma GK}$
$Z_6$	0	1	0	$P(Z_6) = (1 - K_{\Gamma G}) K_{\Gamma R} (1 - K_{\Gamma GK})$
$Z_7$	0	0	1	$P(Z_7) = (1 - K_{\Gamma G}) (1 - K_{\Gamma R}) K_{\Gamma GK}$
$Z_8$	0	0	0	$P(Z_8) = (1 - K_{\Gamma G}) (1 - K_{\Gamma R}) \times$ $\times (1 - K_{\Gamma GK})$

Аналізуючи табл. 2, відзначаємо, що ймовірність  $P_G$  використання GPS при обсервації місця судна є сумою ймовірностей станів, в яких GPS знаходиться у справному стані. станами є  $Z_1, Z_2, Z_3$  і  $Z_4$ , тому:

$$P_G = K_{IG}K_{IR}K_{IGK} + K_{IG}(1 - K_{IR})K_{IGK} + K_{IG}K_{IR}(1 - K_{IGK}) + K_{IG}(1 - K_{IR}) \times \\ \times (1 - K_{IGK}),$$

або

$$P_G = K_{IG}$$

РЛС використовується для обсервації у разі, якщо неможливо отримати інформацію від GPS, тобто в станах  $Z_5$  і  $Z_6$ , отже, ймовірність  $P_R$  визначається виразом:

$$P_R = (1 - K_{IG})K_{IR}K_{IGK} + (1 - K_{IG})K_{IR}(1 - K_{IGK}),$$

або

$$P_R = (1 - K_{IG})K_{IR}.$$

Визначення місця судна по ГК здійснюється тільки в стані  $Z_7$ , коли GPS та РЛС не можуть бути використані для обсервації. Очевидно, у такому разі:

$$P_{GK} = (1 - K_{IG})(1 - K_{IR})K_{IGK}$$

Ймовірність працездатного стану  $P_{ob}$  системи обсервації  $S_{ob}$  є сумою ймовірностей  $P_G$ ,  $P_R$  і  $P_{GK}$ , тобто

$$P_{ob} = P_G + P_R + P_{GK} = K_{IG} + (1 - K_{IG})K_{IR} + (1 - K_{IG})(1 - K_{IR})K_{IGK} = K_{IG} + \\ + K_{IR} - K_{IG}K_{IR} + K_{IGK}(1 - K_{IG} - K_{IR} + K_{IG}K_{IR}),$$

або

$$P_{ob} = 1 - 1 + K_{IG} + K_{IR} - K_{IG}K_{IR} + K_{IGK}(1 - K_{IG} - K_{IR} + K_{IG}K_{IR}) = 1 - (1 - \\ - K_{IG})(1 - K_{IR})(1 - K_{IGK}).$$

Ймовірність втрати працездатності  $\overline{P_{ob}}$  системи  $S_{ob}$  дорівнює ймовірності стану  $Z_8$ , тобто:

$$\overline{P_{ob}} = P(Z_8) = (1 - K_{IG})(1 - K_{IR})(1 - K_{IGK}).$$

Вочевидь, що  $P_{ob} + \overline{P_{ob}} = 1$ , що й доводиться коректність отриманих виразів для ймовірностей  $P_G$ ,  $P_R$  і  $P_{GK}$ .

Таким чином, дисперсія модуля векторіальної похибки обсервації  $D_\chi$  (12) набуває вигляду:

$$D_\chi = D_G K_{IG} + D_R (1 - K_{IG}) K_{IR} + D_{GK} (1 - K_{IG}) (1 - K_{IR}) K_{IGK}.$$

У випадку, коли система обсервації містить  $n$  незалежних приладів, з погляду працездатності вона характеризується  $2^n$  станами, які характеризуються різними поєднаннями станів працездатності і відмов приладів системи обсервації. Якщо дисперсії обсервації приладів задовольняють нерівність:

$$D_1 < D_2 < \dots < D_i < \dots < D_n,$$

то відношення переваги на безлічі приладів  $G_i$  для визначення обсервованого місця судна виражається такою впорядкованою послідовністю:

$$G_1 > G_2 > \dots > G_i > \dots > G_n.$$

Дотримуючись цього відношення переваги, можливість  $P_i$  отримання обсервації з точністю  $D_i$  з урахуванням надійності приладів системи обсервації визначається наступними виразами з точністю:

$$\begin{aligned} P_1 &= K_{\Gamma 1}, \\ P_2 &= K_{\Gamma 2} (1 - K_{\Gamma 1}) \\ P_3 &= K_{\Gamma 3} (1 - K_{\Gamma 1}) (1 - K_{\Gamma 2}) \\ &\dots\dots\dots \\ P_i &= K_{\Gamma i} \prod_{j=1}^{i-1} (1 - K_{\Gamma j}), \end{aligned}$$

.....

$$P_n = K_{\Gamma n} \prod_{j=1}^{n-1} (1 - K_{\Gamma j}).$$

У цьому випадку дисперсія модуля векторіальної похибки обсервації  $D_\chi$  набуває вигляду:

$$D_\chi = \sum_i^n [D_i K_{\Gamma i} \prod_{j=1}^{i-1} (1 - K_{\Gamma j})], \quad (13)$$

де  $K_{\Gamma i}$  – коефіцієнт готовності  $i$ -го приладу системи обсервації.

Аналогічно можна отримати вираз дисперсії модуля векторіальної похибки прогнозу  $D_\theta$ :

$$D_\theta = \sum_i^m [\tilde{D}_i \tilde{K}_{\Gamma i} \prod_{j=1}^{i-1} (1 - \tilde{K}_{\Gamma j})], \quad (14)$$

де  $m$  – кількість способів прогнозу збільшення координат судна за інтервал часу  $\Delta t$  з урахуванням приладів прогнозу параметрів руху судна;

$\tilde{D}_i$  – дисперсія модуля векторіальної похибки прогнозу при  $i$ -му способі прогнозу;

$\tilde{K}_{\Gamma i}$  – коефіцієнт готовності приладів, що забезпечують  $i$ -й спосіб прогнозу.

Прогноз руху судна може здійснюватися за допомогою лага і курсовказівника, причому на судні, крім магнітного компаса, є один або кілька гірокомпасів, або інерційною навігаційною системою. Як прилад прогнозу може бути використана GPS, якщо використовувати інформацію про шляховий кут та шляхову швидкість.

Ще одним важливим аспектом, що характеризує точність утримання судна на програмній траєкторії, є детермінована складова, яка викликана нищпоренням судна щодо заданої траєкторії руху. Детерміновану складову показника ефективності функціонування системи  $S_m$  доцільно характеризувати

максимальним значенням бічного зміщення (знесення) судна  $d_{\max}$  відносно його програмної траєкторії руху.

Тому у якості показника  $Q_{\Sigma}$ , що враховує як стохастичну, так і детерміновану складові пропонується сума їх характеристик:

$$Q_{\Sigma} = Q_s + d_{\max}$$

або

$$Q_{\Sigma} = D_{\chi} + D_{\theta} + fD_{\xi} + d_{\max}.$$

Так як вирази для дисперсій  $D_{\chi}$  та  $D_{\theta}$  отримані у явному вигляді (13) і (14), то надалі слід отримати аналітичні вирази для дисперсії  $D_{\xi}$  та бічного зносу судна  $d_{\max}$ .

Вираз дисперсії  $D_{\xi}$  модуля векторіальної похибки повороту  $\xi$  може бути отримано наступним чином. При виконанні повороту судном векторіальна похибка керування судном  $S^{(c)}$  є сумою векторіальної похибки  $S^{(\beta)}$ , яка виникає через похибку перекладки пера руля  $\Delta\beta_k$ , і векторіальної похибки  $S^{(t)}$ , що виникає через похибку вибору моменту часу початку повороту  $\Delta t_n$ .

Відповідно роботі [557], розглянемо векторіальну похибку  $S^{(\beta)}$ , для чого звернемося до рис. 4. Якщо кладка руля робиться без похибки, то після повороту судно опиниться в точці М на новій ділянці траєкторії, і векторіальна похибка  $S^{(\beta)}$  не виникає. У разі появи похибки  $\Delta\beta_k$  дійсний кут кладки руля становить величину  $\beta_k + \Delta\beta_k$ , а судно до кінця маневру виявляється в точці N. При цьому векторіальна похибка  $S^{(\beta)}$  дорівнює за величиною відрізка MN, причому її складові  $S_x^{(\beta)}$  і  $S_y^{(\beta)}$  визначаються виразами:

$$S_x^{(\beta)} = x_N - x_M \quad \text{і} \quad S_y^{(\beta)} = y_N - y_M, \quad (15)$$

де  $x_M$  і  $y_M$  – координати точки М;

$x_N$  і  $y_N$  – координати точки N.

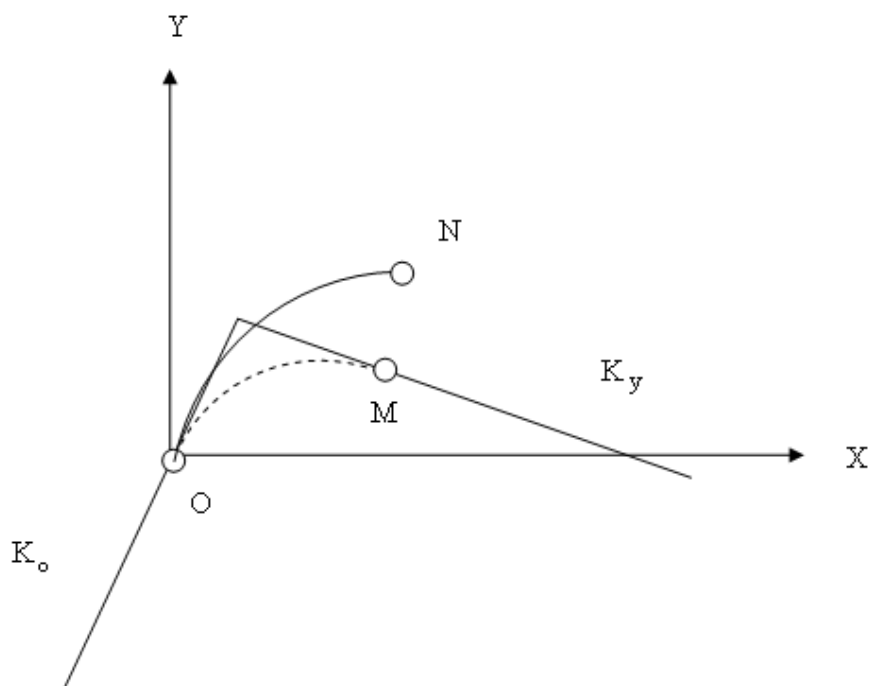


Рисунок 4. Виникнення векторіальної похибки  $S^{(\beta)}$

Якщо обертальний рух судна відбувається з постійною кутовою швидкістю, то воно характеризується рівнянням:

$$\dot{K} = k_{\omega} \beta_k ,$$

де  $k_{\omega}$  – коефіцієнт ефективності руля.

У цьому випадку курс судна змінюється відповідно до виразу:

$$K = K_o + k_{\omega} \beta_k t ,$$

причому тривалість  $\tau$  повороту судна:

$$\tau = \Delta K / k_{\omega} \beta_k ,$$

де  $\Delta K = K_y - K_o$ .

Знайдемо координати точки М, які, очевидно, можна знайти з виразів:

$$x_M = \int_0^\tau V_o \sin[K_o + a_\omega t] dt = V_o \sin K_o \int_0^\tau \cos(a_\omega t) dt + V_o \cos K_o \times \\ \times \int_0^\tau \sin(a_\omega t) dt,$$

$$y_M = \int_0^\tau V_o \cos(K_o + a_\omega t) dt = V_o \cos K_o \int_0^\tau \cos(a_\omega t) dt - V_o \sin K_o \times \\ \times \int_0^\tau \sin(a_\omega t) dt,$$

де  $a_\omega = k_\omega \beta_k$ .

Зазначаємо, що у попередніх виразах інтеграли дорівнюють:

$$\int_0^\tau \sin(a_\omega t) dt = -\frac{1}{a_\omega} \cos a_\omega t \Big|_0^\tau = -\frac{1}{a_\omega} [\cos a_\omega \tau - 1],$$

$$\int_0^\tau \cos(a_\omega t) dt = \frac{1}{a_\omega} \sin a_\omega t \Big|_0^\tau = \frac{1}{a_\omega} \sin a_\omega \tau.$$

Враховуємо, що  $a_\omega \tau = \Delta K$  і  $K_o + \Delta K = K_y$ , тому вирази для координат  $x_M$  та  $y_M$  набувають вигляду:

$$x_M = \frac{V_o}{k_\omega \beta_k} (\cos K_o - \cos K_y),$$

$$y_M = \frac{V_o}{k_\omega \beta_k} (\sin K_y - \sin K_o).$$

Таким же чином виражаються координати  $x_N$  та  $y_N$  точки N:

$$x_N = \frac{V_o}{k_\omega (\beta_k + \Delta \beta_k)} (\cos K_o - \cos K_y),$$

$$y_N = \frac{V_o}{k_\omega (\beta_k + \Delta \beta_k)} (\sin K_y - \sin K_o).$$

Складові  $S_x^{(\beta)}$  та  $S_y^{(\beta)}$  векторіальної похибки згідно (15):

$$S_x^{(\beta)} = \frac{V_o}{k_\omega} (\cos K_o - \cos K_y) \left[ \frac{1}{(\beta_k + \Delta\beta_k)} - \frac{1}{\beta_k} \right],$$

$$S_y^{(\beta)} = \frac{V_o}{k_\omega} (\sin K_y - \sin K_o) \left[ \frac{1}{(\beta_k + \Delta\beta_k)} - \frac{1}{\beta_k} \right].$$

Якщо врахувати, що  $\beta_k \gg \Delta\beta_k$ , то справедливі рівності:

$$S_x^{(\beta)} = \frac{-V_o}{k_\omega \beta_k^2} (\cos K_o - \cos K_y) \Delta\beta_k,$$

$$S_y^{(\beta)} = \frac{-V_o}{k_\omega \beta_k^2} (\sin K_y - \sin K_o) \Delta\beta_k. \quad (16)$$

Таким чином, отримана залежність векторіальної похибки  $S^{(\beta)}$  від похибки кладки руля  $\Delta\beta_k$ .

На рис. 5 показана векторіальна похибка  $S^{(t)}$ , яка викликана похибкою визначення моменту часу початку повороту  $\Delta t_n$ .

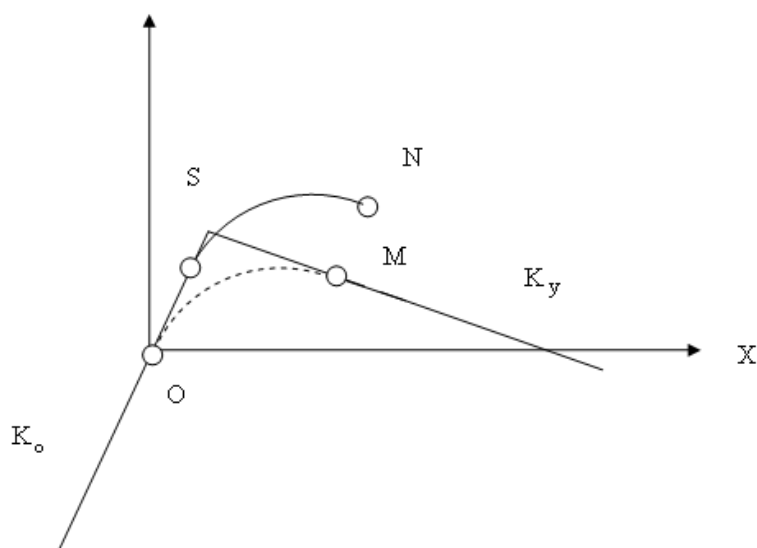


Рисунок 5. Формування векторіальної похибки  $S^{(t)}$



Аналіз рис. 5 показує, що векторіальна похибка  $S^{(t)}$  виражається відрізком MN, рівного за величиною відрізка OS, що дозволяє записати:

$$S^{(t)} = OS = V_o \Delta t_n.$$

Очевидно, проекції  $S_x^{(t)}$  та  $S_y^{(t)}$  векторіальної похибки  $S^{(t)}$  мають вигляд:

$$S_x^{(t)} = V_o \sin K_o \Delta t_n, \quad S_y^{(t)} = V_o \cos K_o \Delta t_n. \quad (17)$$

Позначимо дисперсії центрованих випадкових величин  $\Delta \beta_k$  і  $\Delta t_n$  відповідно через  $D_\beta$  і  $D_t$ . Очевидно, що коваріаційна матриця векторіальної похибки  $S^{(\beta)}$  за відсутності кореляції між складовими набуває такого вигляду:

$$K_\beta^S(x,y) = \begin{vmatrix} D_{\beta x}^S & 0 \\ 0 & D_{\beta y}^S \end{vmatrix},$$

Дисперсії складових  $D_{\beta x}^S$  та  $D_{\beta y}^S$  з урахуванням виразів (16):

$$D_{\beta x}^S = \left[ \frac{V_o}{k_\omega \beta_k^2} (\cos K_o - \cos K_y) \right]^2 D_\beta;$$

$$D_{\beta y}^S = \left[ \frac{V_o}{k_\omega \beta_k^2} (\sin K_y - \sin K_o) \right]^2 D_\beta.$$

Аналогічно, коваріаційна матриця  $K_t^S(x,y)$  векторіальної похибки  $S^{(t)}$ , при її незалежних складових, має такий вигляд:

$$K_t^S(x,y) = \begin{vmatrix} D_{tx}^S & 0 \\ 0 & D_{ty}^S \end{vmatrix}.$$

З урахуванням співвідношень (17) дисперсії складових  $D_{tx}^S$  та  $D_{ty}^S$  похибки  $S^{(t)}$  визначаються виразами:

$$D_{tx}^S = (V_o \sin K_o)^2 D_t;$$

$$D_{ty}^S = (V_o \cos K_o)^2 D_t.$$

Векторіальні похибки  $S^{(\beta)}$  і  $S^{(t)}$  є незалежними, та їх сума, тобто векторіальна похибка повороту  $\xi$ , характеризується коваріаційною матрицею  $K_c^S(x,y)$ , яка є сумою коваріаційних матриць доданків векторіальних похибок [555]:

$$K_c^S(x,y) = K_\beta^S(x,y) + K_t^S(x,y), \text{ або}$$

$$K_c^S(x,y) = \left\| \begin{array}{cc} D_{\beta x}^S + D_{tx}^S & 0 \\ 0 & D_{\beta y}^S + D_{ty}^S \end{array} \right\|.$$

Виходячи з коваріаційної матриці  $K_c^S(x,y)$ , можна записати вираз дисперсії  $D_\xi$  модуля векторіальної похибки повороту  $\xi$ :

$$D_\xi = D_{\beta x}^S + D_{tx}^S + D_{\beta y}^S + D_{ty}^S,$$

або

$$D_\xi = D_\beta \left\{ \left[ \frac{V_o}{k_\omega \beta_k^2} (\cos K_o - \cos K_y) \right]^2 + \left[ \frac{V_o}{k_\omega \beta_k^2} (\sin K_y - \sin K_o) \right]^2 \right\} + D_t V_o^2.$$

Вираз дисперсії  $D_\xi$  можна записати у такому вигляді:

$$D_\xi = D_\beta \left( \frac{V_o}{k_\omega \beta_k^2} \right)^2 [\cos^2 K_o - 2 \cos K_o \cos K_y + \cos^2 K_y + \\ + \sin^2 K_y - 2 \sin K_y \sin K_o + \sin^2 K_o] + D_t V_o^2,$$

або остаточно:

$$D_{\xi} = 2D_{\beta} \left( \frac{V_o}{k_{\omega} \beta_k^2} \right)^2 [1 - \cos(K_o - K_y)] + D_t V_o^2. \quad (18)$$

Таким чином, векторіальна похибка  $\xi$  повороту судна є сумою незалежних векторіальних похибок  $S^{(\beta)}$  і  $S^{(t)}$ , що виникають через неточності в перекладці пера руля і вибору моменту часу початку повороту судна.

Коваріаційна матриця векторіальної похибки управління судном є сумою коваріаційних матриць похибок  $S^{(\beta)}$  і  $S^{(t)}$ , а дисперсії  $D_{\xi}$  формалізована виразом (18).

При виконанні повороту судном векторіальна похибка відносно прогнозованої точки виходу судна на новий курс також може з'явитися при виборі моменту часу початку повороту  $t_n$  для того, щоб після повороту опинитися в прогнозованій точці, проводиться з урахуванням динамічної моделі повороткості судна. Прогнозована траєкторія, яка визначається динамічною моделлю повороткості судна, відрізняється від його реальної траєкторії, що веде до виникнення похибки  $\Delta t_n$  у визначенні моменту часу початку повороту судна  $t_n$  і, отже, до появи систематичної складової векторіальної похибки керування  $S^{(d)}$ . Розглянемо механізм появи систематичної векторіальної похибки  $S^{(d)}$ , для цього звернемося до рис. 6.

Виходячи з обраної динамічної моделі повороткості судна, розраховується момент часу початку повороту  $t_n$ , якому відповідає точка С на програмній траєкторії руху і прогнозована перехідна траєкторія руху показана пунктирною лінією. Для реальної траєкторії руху поворот необхідно починати в момент часу  $\tilde{t}_n$ , якому відповідає точка В.

Починаючи поворот у розрахований момент часу  $t_n$ , судно опиниться в точці N замість точки М. Очевидно, що систематична векторіальна похибка  $S^{(d)}$  дорівнює за величиною відстані між точками М і N, тобто відрізку MN. У свою чергу, з рисунка видно, що відрізки MN та ВС рівні між собою і, отже, систематична векторна похибка  $S^{(d)}$  дорівнює відрізку ВС, тобто  $S^{(d)} = BC$ .



моменту часу початку повороту, а також зниженням систематичної векторіальної похибки  $S^{(d)}$  шляхом вибору найбільш адекватної динамічної моделі поворотності судна для розрахунку моменту початку повороту  $t_n$ .

Таким чином, зниження втрат пройденої відстані через вплив траєкторної похибки можливе такими заходами:

1. Мінімізацією дисперсії модуля похибки обсервації  $D_\chi$  за рахунок збільшення ефективності обсервованих координат судна або використанням надлишкових ліній положення.

2. Зниженням систематичної векторіальної похибки повороту  $S^{(d)}$  шляхом вибору найбільш адекватної динамічної моделі поворотності судна для розрахунку моменту початку повороту  $t_n$ .

3. Підвищення експлуатаційної надійності системи навігаційної інформації, що визначає ймовірність отримання навігаційних параметрів.

Останній пункт актуальний для заводів-виробників навігаційної апаратури, тому для дослідження становлять інтерес пункти, що залишилися.

Розглянемо складову втрати пройденої відстані  $\Delta S$ , коли судно для виконання маневру розходження відхиляється від програмної траєкторії руху і потім повертається на неї після закінчення маневру.

Розглянемо алгоритм вибору оптимального маневру розходження з безлічі допустимих маневрів  $U$ , при якому досягається мінімальне значення критерію оптимальності  $\Delta S$ , що виникають внаслідок розходження.

Враховуючи, що маневр розходження завершується виходом судна на програмну траєкторію руху, можна обчислити фактичну довжину частини програмної траєкторії  $S_m$ , яку пройшло судно протягом маневру розходження, і відстань  $S$ , яке судно пройшло б по програмній траєкторії без маневрування. Різниця  $\Delta S = S_m - S$  є втратою пройденої відстані, і її приймаємо як критерій оптимальності, що характеризує економічність маневру.

Знайдемо залежність величини  $\Delta S$  від параметрів маневру розходження  $t_y$ ,  $K_y$ ,  $t_b$  та  $K_b$ . Для цього звернемося до рис. 7, на якому наведено ілюстрацію

ситуації розходження в околиці програмного повороту, тобто. коли програмна траєкторія містить дві ділянки з курсами  $K_{01}$  та  $K_{02}$ . Очевидно, що:

$$S_m = V_o(\Delta t_b + \Delta t_k) \text{ і } S = S_a + dS,$$

де  $\Delta t_b = t_b - t_y$ ,  $\Delta t_k = t_k - t_b$  і  $dS = \sqrt{(X_k - X_m)^2 + (Y_k - Y_m)^2}$ .

Тоді отримаємо:

$$\Delta S = V_o(\Delta t_b + \Delta t_k) - S_a - \sqrt{(X_k - X_m)^2 + (Y_k - Y_m)^2}.$$

Знайдемо вираз для координат  $X_k$ ,  $Y_k$  і моменту часу  $t_k$ . Для цього записуємо рівняння другої ділянки програмної траєкторії як прямої, що проходить через точку з координатами  $X_m$  і  $Y_m$ :

$$(Y - Y_m) \sin K_{02} = (X - X_m) \cos K_{02}.$$

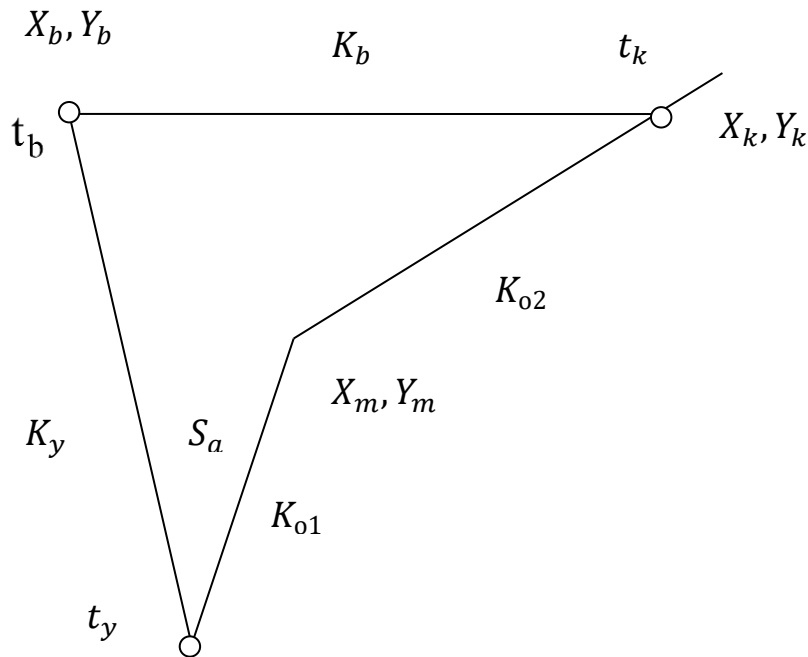


Рисунок 7. До виведення виразу для критерії оптимальності  $\Delta S$ .

З іншого боку, поточні значення координат судна на ділянці виходу на програмну траєкторію мають вигляд:

$$X = X_b + V_o t \sin K_b, \quad Y = Y_b + V_o t \cos K_b.$$

Оскільки точка  $(X_k, Y_k)$  одночасно належить обом прямим, то справедлива рівність:

$$(Y_b + V_o \Delta t_k \cos K_b - Y_m) \sin K_{o2} = (X_b + V_o \Delta t_k \sin K_b - X_m) \cos K_{o2},$$

з якого знаходимо вираз для  $\Delta t_k$ :

$$\Delta t_k = \frac{[(X_b - X_m) \cos K_{o2} - (Y_b - Y_m) \sin K_{o2}]}{V_o \sin(K_{o2} - K_b)}.$$

При відомому значенні  $\Delta t_k$  нескладно знайти вирази для  $X_k$  і  $Y_k$ , які мають такий вигляд:

$$X_k = X_b + V_o \Delta t_k \sin K_b, \quad Y_k = Y_b + V_o \Delta t_k \cos K_b.$$

Підставляючи вирази для  $\Delta t_k$ , отримаємо:

$$X_k = X_b + \frac{[(X_b - X_m) \cos K_{o2} - (Y_b - Y_m) \sin K_{o2}]}{\sin(K_{o2} - K_b)} \sin K_b,$$
$$Y_k = Y_b + \frac{[(X_b - X_m) \cos K_{o2} - (Y_b - Y_m) \sin K_{o2}]}{\sin(K_{o2} - K_b)} \cos K_b.$$

Знаходимо вирази для збільшення координат  $X_k - X_m$  та  $Y_k - Y_m$ , використовуючи отримані залежності:

$$\begin{aligned} X_k - X_m &= X_b - X_m + \frac{[(X_b - X_m) \cos K_{o2} - (Y_b - Y_m) \sin K_{o2}]}{\sin(K_{o2} - K_b)} \sin K_b = \\ &= \frac{(X_b - X_m) \sin(K_{o2} - K_b)}{\sin(K_{o2} - K_b)} + \frac{[(X_b - X_m) \cos K_{o2} - (Y_b - Y_m) \sin K_{o2}]}{\sin(K_{o2} - K_b)} \sin K_b = \\ &= \frac{\sin K_{o2} [(X_b - X_m) \cos K_b - (Y_b - Y_m) \sin K_b]}{\sin(K_{o2} - K_b)} \end{aligned}$$

Аналогічно знаходимо вираз для  $Y_k - Y_m$ :

$$\begin{aligned} Y_k - Y_m &= Y_b - Y_m + \frac{[(X_b - X_m) \cos K_{o2} - (Y_b - Y_m) \sin K_{o2}]}{\sin(K_{o2} - K_b)} \cos K_b = \\ &= \frac{\cos K_{o2} [(X_b - X_m) \cos K_b - (Y_b - Y_m) \sin K_b]}{\sin(K_{o2} - K_b)} \end{aligned}$$

Знайдемо вираз:

$$\sqrt{(X_k - X_m)^2 + (Y_k - Y_m)^2} = \frac{(X_b - X_m) \cos K_b - (Y_b - Y_m) \sin K_b}{\sin(K_{o2} - K_b)}$$

яке підставляємо в  $\Delta S$  та отримуємо:

$$\begin{aligned} \Delta S &= V_o \Delta t_b + \frac{[(X_b - X_m) \cos K_{o2} - (Y_b - Y_m) \sin K_{o2}]}{\sin(K_{o2} - K_b)} - S_a - \\ &\quad - \frac{(X_b - X_m) \cos K_b - (Y_b - Y_m) \sin K_b}{\sin(K_{o2} - K_b)} \end{aligned}$$

Очевидно, що значення координат  $X_b$  і  $Y_b$  визначаються формулами  $X_b = V_o \Delta t_b \sin K_y$  і  $Y_b = V_o \Delta t_b \cos K_y$ , з урахуванням яких останній вираз набуває вигляду:

$$\Delta S = V_o \Delta t_b - S_a + \frac{V_o \Delta t_b [\sin K_y (\cos K_{o2} - \cos K_b) - \cos K_y (\sin K_{o2} - \sin K_b)]}{\sin(K_{o2} - K_b)} +$$



$$+ \frac{Y_m(\sin K_{o2} - \sin K_b) - X_m(\cos K_{o2} - \cos K_b)}{\sin(K_{o2}-K_b)}$$

Перший доданок отриманого виразу множимо і ділимо на  $\sin(K_{o2}-K_b)$  і після перетворення остаточно знаходимо:

$$\Delta S = \frac{V_o \Delta t_b [\sin(K_{o2}-K_b) + \sin(K_b-K_y) + \sin(K_y-K_{o2})]}{\sin(K_{o2}-K_b)} +$$

$$+ \frac{Y_m(\sin K_{o2} - \sin K_b) - X_m(\cos K_{o2} - \cos K_b)}{\sin(K_{o2}-K_b)} - S_a$$

Очевидно, у випадку програмної траєкторії, що має одну ділянку з курсом  $K_o$ , величина  $\Delta S$  визначається наступним виразом:

$$\Delta S = \frac{V_o(t_b-t_y)[\sin(K_o-K_b)+\sin(K_b-K_y)+\sin(K_y-K_o)]}{\sin(K_o-K_b)}, \quad (19)$$

так як  $S_a = 0$ .

Отримавши залежність критерію оптимальності  $\Delta S$  від параметрів маневру розходження  $t_y$ ,  $K_y$ ,  $t_b$  і  $K_b$ , необхідно знайти процедуру обчислення їх оптимальних значень, які обертають мінімум втрати пройденої відстані  $\Delta S$ . Для подальшого розгляду припустимо, що існує допустима безліч маневрів розходження з відомими граничними значеннями параметрів  $t_{y*}$ ,  $t_y^*$ ,  $K_{y*}$ ,  $K_y^*$ ,  $t_{b*}$ ,  $t_b^*$ ,  $K_{b*}$ ,  $K_b^*$ . Особливістю розглянутої оптимізаційної задачі є залежність граничних значень  $K_{y*}$ ,  $K_y^*$ ,  $t_{b*}$  і  $t_b^*$  від величин параметрів  $t_y$ ,  $K_y$  і  $K_b$ , причому  $K_{y*}$  залежить тільки від поточного значення  $t_y$ , тоді як  $t_{b*}$  залежить від усіх трьох параметрів  $t_y$ ,  $K_y$  і  $K_b$ .

Тому доцільно вчинити в такий спосіб. Необхідно дослідити поведінку критерію оптимальності  $\Delta S$  за допомогою приватних похідних за параметрами маневру розходження, причому знаходити оптимальне значення одного з

параметрів та модифікувати критерій оптимальності, зменшуючи його розмірність на одиницю шляхом виключення оптимального параметра. Доцільно спочатку зробити зазначену процедуру з параметром  $t_b$ , оскільки його граничні значення є функцією найбільшого числа параметрів.

Знайдемо приватну похідну  $\frac{\partial \Delta S}{\partial t_b}$ . Очевидно, що незалежно від числа ділянок програмної траєкторії, справедливим є вираз:

$$\frac{\partial \Delta S}{\partial t_b} = \frac{V_o[\sin(K_o-K_b)+\sin(K_b-K_y)+\sin(K_y-K_o)]}{\sin(K_o-K_b)}.$$

Позначимо  $\gamma_b = K_o - K_b$  та  $\gamma_y = K_y - K_o$ . Тоді вираз для похідної набуває наступного вигляду:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Delta S}{\partial t_b} &= \frac{V_o[\sin(K_o-K_b) + \sin(K_b-K_y) - \sin(K_y-K_o)]}{\sin(K_o-K_b)} = \\ &= V_o \left[ 1 + \frac{\sin(K_b-K_y) + \sin(K_y-K_o)}{\sin(K_o-K_b)} \right], \\ &\text{або} \\ \frac{\partial \Delta S}{\partial t_b} &= V_o \left[ 1 + \frac{-\sin(\gamma_b + \gamma_y) + \sin \gamma_y}{\sin \gamma_b} \right] = \\ &= V_o \left[ 1 + \frac{\sin \gamma_y - \sin \gamma_y \cos \gamma_b - \cos \gamma_y \sin \gamma_b}{\sin \gamma_b} \right] = \\ &= V_o \left[ 1 + \frac{\sin \gamma_y (1 - \cos \gamma_b) - \cos \gamma_y \sin \gamma_b}{\sin \gamma_b} \right] = V_o \left[ 1 + \sin \gamma_y \frac{(1 - \cos \gamma_b)}{\sin \gamma_b} - \cos \gamma_y \right]. \end{aligned}$$

Враховуємо, що  $\sin \gamma_b = 2 \sin \frac{\gamma_b}{2} \cos \frac{\gamma_b}{2}$  і  $1 - \cos \gamma_b = 2 \sin^2 \frac{\gamma_b}{2}$ , тому:

$$\frac{\partial \Delta S}{\partial t_b} = V_o \left[ 1 + \sin \gamma_y \operatorname{tg} \frac{\gamma_b}{2} - \cos \gamma_y \right].$$

Звертаємо увагу на ту обставину, що добуток  $\sin \gamma_y \operatorname{tg} \frac{\gamma_b}{2} \geq 0$  для всіх допустимих значень  $\gamma_y \leq \pi$  і  $\gamma_b \leq \pi$ , а також  $1 - \cos \gamma_y \geq 0$ . Отже,  $\frac{\partial \Delta S}{\partial t_b} \geq 0$  незалежно від значень параметрів розходження. Це означає, що мінімум  $\Delta S$  досягається при  $t_b = t_{b^*}$

Тому, підставляючи у вираз (19) для  $\Delta S$  аналітичну залежність, якою виражається  $t_{b^*}$ , зробимо модифікацію критерію оптимальності  $\Delta S$ , виключаючи змінну  $t_b$ , і цим знижуючи його розмірність на одиницю, тобто  $\Delta S_1 = \Delta S(t_{b^*})$ , причому  $\Delta S_1 = f(t_y, K_y, K_b)$ .

Враховуємо, що:

$$t_{b^*} = t_y + \frac{\Delta_b D_d + D_n \sin(\alpha_n - K_{otb}) + V_{otn} t_y \sin(K_{otb} - K_{otn})}{V_{oty} \sin(K_{oty} - K_{otb})}.$$

Тому для стандартного маневру розходження у випадку однієї ділянки програмної траєкторії отримаємо:

$$\Delta S_1 = \frac{V_o(t_{b^*} - t_y)[\sin(K_o - K_b) + \sin(K_b - K_y) + \sin(K_y - K_o)]}{\sin(K_o - K_b)}, \quad (20)$$

або після підстановки виразу для  $t_{b^*}$ :

$$\Delta S_1 = G_1 \frac{V_o[\sin(K_o - K_b) + \sin(K_b - K_y) + \sin(K_y - K_o)]}{\sin(K_o - K_b)},$$

де  $G_1 = \frac{\Delta_b D_d + D_n \sin(\alpha_n - K_{otb}) + V_{otn} t_y \sin(K_{otb} - K_{otn})}{V_{oty} \sin(K_{oty} - K_{otb})}$ .

Значення курсу виходу  $K_b$  є фіксованою величиною і визначається лише програмним курсом  $K_o$ , тобто  $K_b = K_o - 30\delta$ , де  $\delta = 1$ , при істинному ухиленні судна вправо і  $\delta = -1$  при ухиленні вліво. Тому модифікований критерій

оптимальності  $\Delta S_1$  залежить лише від часу  $t_y$  та курсу  $K_y$  ухилення, тобто  $\Delta S_1 = f(t_y, K_y)$ .

Аналіз приватної похідної критерію оптимальності  $\Delta S_1$  за параметром  $K_y$ , показав, що знак похідної  $\frac{\partial \Delta S_1}{\partial K_y}$  збігається зі знаком виразу  $\sin(K_o - K_b)$  який, у свою чергу, визначається знаком характеристики істинного ухилення судна  $\delta$ . Тому знак приватної похідної  $\frac{\partial \Delta S_1}{\partial K_y}$  співпадає зі знаком  $\delta$ . Це означає, що мінімум критеріїв оптимальності  $\Delta S_1$  і  $\Delta S$  досягається на нижній межі курсу ухилення  $K_{y*}$ .

Цей висновок підтверджується рис. 8, з якого випливає, що довжина траєкторії маневру розходження OAB з курсом ухилення  $K_{y*}$  є мінімальною порівняно з іншими траєкторіями, наприклад, траєкторії OCB з курсом ухилення  $K_y$ .

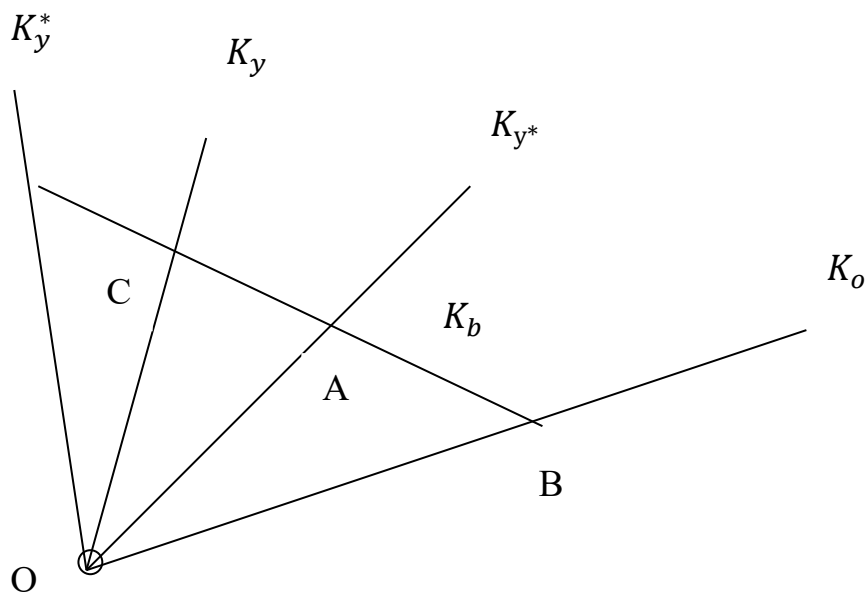


Рисунок 8. Мінімальна траєкторія

Вибір оптимального значення часу ухилення  $t_y$  визначається наступною обставиною. Очевидно, що нижня межа курсу ухилення  $K_{y*}$  є функцією часу ухилення  $t_y$ , що росте, як показано на рис. 9.

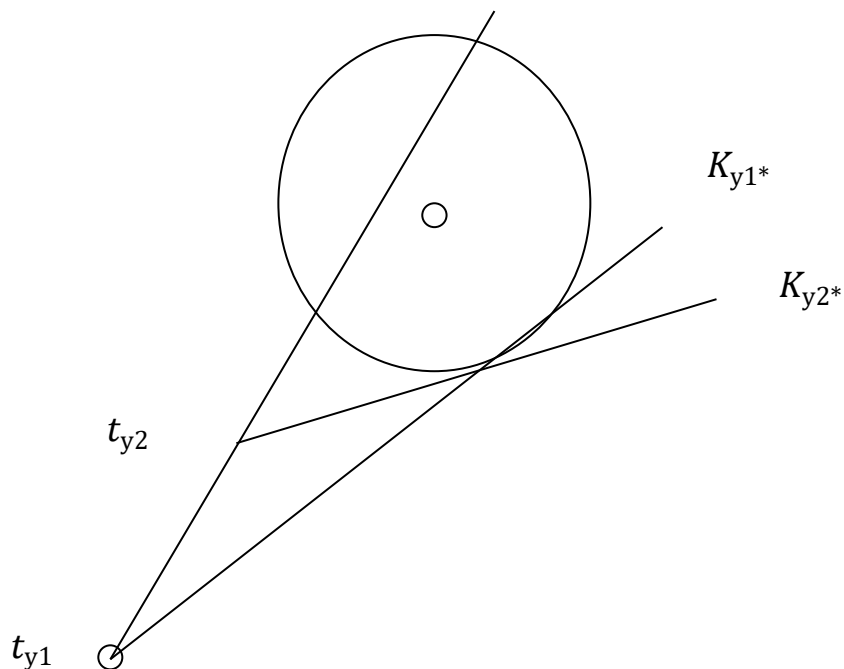


Рисунок 9. Залежність  $K_{y*}$  від  $t_y$

Отже, найменше значення  $K_{y*}$  досягається на нижній межі часу ухилення  $t_{y*}$ , що забезпечує мінімальне значення  $\Delta S$  по всіх параметрах маневру розходження.

Таким чином, оптимальними параметрами маневру розходження є нижня межа часу ухилення  $t_{y*}$  заданий курсу виходу  $K_b$ , за якими обчислюються нижні межі курсу ухилення  $K_{y*}$  та часу виходу  $t_{b*}$ .

Мінімізація втрат пройденої відстані досягається вибором оптимального маневру розходження, мінімізацією дисперсії модуля похибки обсервації  $D_\chi$  та вибором адекватної динамічної моделі поворотності судна.

## REFERENCES

1. Технічні характеристики силосів моделей 85-09022 та 85-09024 виробника «Brock» згідно даних каталогу «Commercial Grain Bins» виробника Brock Grain systems a Division of CTB, Inc. ([www.brockgrain.com](http://www.brockgrain.com)) – Kansas City, Frankfort.
2. ДБН В.2.1-10-2009. Основи та фундаменти споруд. – Київ : Мінрегіонбуд України, 2009.
3. ДСТУ-Н Б В.1.1-27:2010. Будівельна кліматологія. – Київ : Мінрегіонбуд, 2011.
4. ДСТУ-Н Б В.1.2-18:2016. Настанова щодо обстеження будівель і споруд для визначення та оцінки їх технічного стану. – Київ : ДП „УкрНДНЦ”, 2017.
5. Перерозподіл зусиль в будівлях та спорудах від деформацій їх елементів і основ: монографія / Д.Гладишев, Г.Гладишев, Р.Гладишев – Львів: Норма, 2024–236с.
6. Youth's Civic and Political Activity: Modern Reality | Hromadsky Prostir. (n.d.). Hromadsky Prostir | Everything for the Third Sector on One Portal. <https://www.prostir.ua/?focus=hromadska-ta-politychna-aktyvnist-molodi-suchasna-dijsnist>
7. Yuzich, Yu. (2022, January 26). Youth Worker. A Brief History of Youth Centers. <https://youth-worker.org.ua/uncategorized/kоротка-istoriya-molodizhnyh-czentriv/>
8. Youth Centers in Ukraine. (2017). [https://decentralization.ua/uploads/library/file/141/Molodizhni\\_centrii\\_v\\_Ukrayini.pdf](https://decentralization.ua/uploads/library/file/141/Molodizhni_centrii_v_Ukrayini.pdf)
9. How Ukrainian Youth Spends Leisure Time. (2020, December 9). <https://vechirniy.kyiv.ua/news/47222/>
10. Youth Policy in United Territorial Communities. (2018). <https://fundraiser.games/uploads/files/materials/23/adbad196b59c0090a69d2cc27114a867.pdf>
11. Standards for Youth Centers. (2024, June 3). <https://youth-worker.org.ua/library/standarty-molodizhnykh-tsentriv/>
12. Youth Centers: Basic Principles and Foundations. (2017). Methodological Recommendations. [https://dodmc.dn.ua/images/stories/Biblioteka/molodizni\\_centri.pdf](https://dodmc.dn.ua/images/stories/Biblioteka/molodizni_centri.pdf)
13. Anastasia Hulevata, Sofia Polishchuk. (2023). How to Create a Community Space: Step-by-Step Guide. A Manual for Local Authorities and Communities. [https://dodmc.dn.ua/images/stories/Biblioteka/molodizni\\_centri.pdf](https://dodmc.dn.ua/images/stories/Biblioteka/molodizni_centri.pdf)
14. Glovyn, N., et al. Technical, agricultural and physical sciences as the main sciences of human development. International Science Group, 2024.

15. Lemeshev, M., et al. Applied, technical and agricultural sciences: introduction of the latest technologies into use. International Science Group, 2024
16. Hladyshev, D., et al. Technical and agricultural sciences in modern realities: problems, prospects and solutions. International Science Group, 2023.
17. Ковальський, В. П., et al. "Использование минеральных заполнителей, наполнителей и микронаполнителей в сухих строительных смесях для поризованных растворов." Technical research and development: collective monograph. 8.9: 360–366. (2021).
18. Сівак, Р. В. Використання нових конструктивних рішень для влаштування дорожнього одягу. ВНТУ, 2021.
19. Березюк, О. В. "Математичне моделювання прогнозування обсягів продукування будівельних відходів в різних країнах світу." Вісник Вінницького політехнічного інституту 3 (2021): 41-46.
20. Lemeshev, M., et al. "Perspective direction of recycling of industrial waste in the technology of production of building materials." (2020).
21. Hladyshev, D., et al. Prospective directions of scientific research in engineering and agriculture. International Science Group, 2023.
22. Стаднійчук, М. Ефективність використання цементобетону для будівництва автомобільних доріг. ВНТУ, 2024.
23. Stadniychuk, M. Modified building materials based on industrial waste. Харківський національний університет міського господарства імені ОМ Бекетова, 2020.
24. Сівак, Р. В. Спеціальні покриття для захисту від високих температур. Національний університет цивільного захисту України, 2024.
25. Березюк, О. В., М. С. Лемешев, and В. П. Ковальський. "Будівельні вироби з механо-активованих промислових, побутових відходів." (2023).
26. Kornylo, I., et al. "Scientific foundations in research in Engineering." (2022)
27. Лемешев, М. С., et al. "Перспективи використання техногенної сировини при виробництві композиційних в'язучих." Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві. № 2: 36-45. (2022).
28. Beresjuk, O., et al. Theoretical and scientific foundations in research in Engineering. Vol. 1. International Science Group, 2022.
29. Stadnijschuk, M. Composite materials using metal sludge. Харківський національний університет міського господарства імені ОМ Бекетова, 2020.
30. Березюк О.В. Визначення параметрів машин для поводження з твердими відходами : монографія /О.В. Березюк, М.С. Лемешев // Omni Scriptum Publishing Group, 2020. – 61 с.

31. Wójcik, Waldemar, and Małgorzata Pawłowska, eds. *Biomass as Raw Material for the Production of Biofuels and Chemicals*. Routledge, 2021
32. Лемешев, М. С., Сівак, К. К., Стаднійчук, М. Ю. (2021). Сучасні підходи комплексної переробки промислових техногенних відходів. Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві, 31(2), 37-44.
33. Cherepakha, D. *Industrial waste and its processing*. Харківський національний університет міського господарства імені ОМ Бекетова, 2020.
34. Лемешев, М. С., М. Ю. Стаднийчук "Жаростойкое вяжущее на основе промышленных отходов." *Актуальные проблемы пожарной безопасности, предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций*: 168-171. (2019).
35. Stadniychuk, M., *Obtaining active mineral additives from industrial waste*. Національний університет "Львівська політехніка", 2023.
36. Lemeshev, M., O. Bereziuk, and K. Sivak. "Features of the use of industrial waste in the field of building materials." *Scientific foundations in research in Engineering*. 1.2: 25–32. (2022).
37. Khrystych, O. "Technological parameters of the radiationresistant concrete production." *Scientific Works of Vinnytsia National Technical University* 1 (2020).
38. Lemeshev, M., et al. "Perspective uses of industrial waste in the production of building materials." *Scientific foundations of modern engineering*: 205–210. (2019).
39. Sivak, R. *Features of processing of technogenic industrial waste in the construction industry*. ВНТУ, 2021.
40. Lemeshev, M., et al. "Complex binder based on industrial man-made waste." *Technical and agricultural sciences in modern realities: problems, prospects and solutions*: 51–59. (2023).
41. Березюк О.В., Лемешев М.С. Динаміка утворення відходів будівництва і знесення у Вінницькій області // Вісник ВПІ. 2021. № 1. С. 37-41.
42. Stadniychuk, M., *Composite conducted concrete for special purposes*. Національний університет "Львівська політехніка", 2023.
43. Лемешев, М. С., О. В. Христич, and О. В. Березюк. "Дрібнозернистий бетон з модифікованим заповнювачем техногенного походження." *Materiały XI Międzynarodowej naukowo-praktycznej konferencji «Naukowa przestrzeń Europy–2015»*. Sp. z oo «Nauka i studia», 2015.
44. Березюк, О. В., and М. С. Лемешев. "Визначення параметрів машин для поводження з твердими відходами: монографія." *Omni Scriptum* (2020).
45. Стаднійчук, М. Ю. *Пріоритетні напрямки використання відходів*. Івано-Франківськ: Симфонія форте, 2019.



46. Лемешев, М. С., О. В. Христинич, and О. В. Березюк. "Комплексна переробка техногенних відходів хімічної промисловості та металообробних виробництв." *Materiály XI Mezinárodní vědecko-praktická konference «Aktuální vymoženosti vědy–2015»*. Publishing House «Education and Science» sro, 2015., 2015.
47. Палагнюк, С. В. Композиционные материалы полифункционального назначения. Тюменский индустриальный университет, 2012.
48. Лемешев М. С. Ніздрюваті бетони з використанням промислових відходів / М. С. Лемешев, О. В. Березюк // Перспективные инновации в науке, образовании, производстве и транспорте '2017 : материалы международной научно-практической Интернет-конференции. – Москва : SWorld, 2017. – 7 с.
49. Медведь, Я. О. Промислові відходи–альтернатива традиційним природним ресурсам. Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2021.
50. Стаднийчук, М. Ю. "Использование промышленных отходов в строительной отрасли." International Science Group, 2021.
51. Гончар, С. В. Композиційні бетони спеціального призначення. Харківський національний університет міського господарства імені ОМ Бекетова, 2019.
52. Усатюк, В. В. Перспективы использования техногенных отходов в области строительных материалов. Тюменский индустриальный университет, 2017.
53. Лемешев, М. С., Христинич, О. В., Лемішко, К. К. (2019). Екологічно ефективні будівельні матеріали для тепломодернізації будівель. Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві. № 2: 52-61.
54. Sivak, K. Use of industrial waste for increased experimental properties in construction. Львів: Національний університет" Львівська політехніка", 2023.
55. Stadniychuk, M., Modified multi-component fast-hardening construction composites. Національний університет" Львівська політехніка", 2021.
56. Лемешев М. С. Будівельні вироби з використанням промислових відходів Вінниччини / М. С. Лемешев // Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. – 2017. – № 41. – С. 123 – 127
57. Лемішко, К. К., М. Ю. Стаднийчук, and М. С. Лемешев. "Використання промислових відходів енергетичної та хімічної галузі в технології виготовлення будівельних виробів." (2019).
58. Stadniychuk, M. Composite materials based on man-made waste. ВНТУ, 2021.
59. Bereziuk, O., et al. "Forecasting the volume of construction waste." *Theoretical foundations of engineering. Tasks and problems*. 2.1: 70–75. (2021).
60. Lemeshev, M., et al. "Use of industrial waste in the construction industry." *Prospective directions of scientific research in engineering and agriculture*: 19–25. (2023)

61. Сівак, Р. В. Використання безавтоклавного ніздрюватого бетону для влаштування автомобільних доріг. ВНТУ, 2021.
62. Лемешев М. С., Березюк О. В. Легкі бетони отримані на основі відходів промисловості // Сборник научных трудов SWorld. –Иваново: МАРКОВА АД, 2015. –Выпуск 1. Том 13. –С. 111-114.
63. Стаднійчук, М. С. Industrial waste recycling. ВНТУ, 2021.
64. Сівак, К. К. Модифіковані композиційні швидкотвердіючі бетони для будівництва сучасних автомагістралей. ВНТУ, 2021.
65. Сердюк, В. Р. "Комплексне в'яжуче з використанням мінеральних добавок та відходів виробництва." (2009).
66. Sivak, R. Peculiarities of using industrial waste in the construction industry. ВНТУ, 2021.
67. Лемешев, М. С. "В'яжуче на основі промислових відходів." Научные исследования и их практическое применение: материалы международной научно-практической Интернет-конференции, 10-17 октября 2017 г.. Сборник научных трудов SWorld, 2017.
68. Лемішко, К. К. Безвідходна технологія виготовлення будівельних виробів. ВНТУ, 2018.
69. Березюк, О. В., Лемешев, М. С., Стаднійчук, М. Ю. (2023). Поширеність переробки золи при виготовленні будівельних матеріалів. Сучасні технології, матеріали і конструкції у будівництві. № 2: 56-61.
70. Сорока, С. В. "Комплексне використання техногенних відходів промисловості для виготовлення будівельних виробів." Прикладні науково-технічні дослідження: 22- 26. (2019).
71. Лемешев, М. С., Сівак, К. К. (2020). Особливості використання промислових техногенних відходів в галузі будівельних матеріалів. Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві, 29(2), 24-34.
72. Pritchard, J. E. "Introduction to Aerospace Propulsion" / J. E. Pritchard. – Prentice Hall; Facsimile edition, 1998 p., 582 c.
73. Cumpsty, N. "Jet Propulsion: A Simple Guide to the Aerodynamics and Thermodynamic Design and Performance of Jet Engines" / N. Cumpsty. – Cambridge University Press, 1998 p., 297c.
74. Kerrebrock, J. L. "Aircraft Engines and Gas Turbines" / J. L. Kerrebrock. – The MIT Press, 1992 p., 494 c .
75. Watt D. Tolley M. " Aircraft Electrical and Electronic System " / D. Watt, M. Tolley. – Routledge, 2018 p., 438 c.

76. Treager, I. E. "Aircraft Gas Turbine Engine Technology" / I. E. Treager. – McGraw-Hill Education, 1995 p., 688 c.
77. El-Sayed, A. F. "Aircraft Propulsion and Gas Turbine Engines" / A. F. El-Sayed. – CRC Press, 2017 p., 1476 c.
78. Документація по FlightGlobal. URL: <https://www.flightglobal.com/engines/cfm-launches-open-rotor-demonstrator-promising-20-better-fuel-burn-for-mid-2030s-applications/144141.article> (Last accessed: 09.03.2024).
79. Документація по FlightGlobal. <https://www.flightglobal.com/farnborough-2022/ge-aviation-to-become-ge-aerospace-reflecting-expansion-plan/149442.article> (Last accessed: 09.03.2024).
80. Zhang, T., Qiao, G., Barakos, G. N. "Numerical simulation of distributed propulsion systems using CFD" [Text] / T. Zhang, G. Qiao, G. N. Barakos. – Aerospace Science and Technology. – January 2024. – P. 174.
81. McComb, G. "Electric Aircraft Technology" / G. McComb. – CRC Press, 2020 p., 350 c.
82. Документація по AIRBUS <https://www.airbus.com/en/newsroom/news/2017-05-electrifying-the-sky> (Last accessed: 09.03.2024).
83. Costa, R., Pereira, P., Falcão, A. "Electric Flight Technology: The Future of Aviation" / R. Costa, P. Pereira, A. Falcão. – SAE International, 2018 p., 124 c.
84. Документація по AIRBUS <https://www.airbus.com/en/innovation/low-carbon-aviation/hybrid-and-electric-flight/e-fan-x> (Last accessed: 09.03.2024).
85. Mishra R. K. "The Trend of Bypass Ratio in Aero Engines: An Overview" / R. K. Mishra *Journal of Aerospace Sciences and Technologies*. – July 2023. – P 79-89.
86. Goel, S. "Geared Turbofan Engines: A Paradigm Shift in Commercial Aviation Propulsion" / S. Goel // *Journal of Propulsion and Power*. - 2013. - Vol. 29, Issue 6. - P. 1295-1307.
87. Wang, S. C. Simulation of an advanced three-spool engine controller for the development of a full-authority digital electronic control system / S. C. Wang, G. L. Hicks // *NASA Technical Memorandum 100669*. - 1988.
88. Antoni, R. The impact of intercooling on a high bypass ratio turbofan engine / R. Antoni, M. Pajdak // *SAE Technical Paper 2019-01-1908*. – 2019
89. Curran, E. T. Design studies of advanced intercooled and recuperated engines / E. T. Curran, R. D. Bradshaw, D. L. MacArthur // *NASA Contractor Report 201247*. - 1997.
90. Alexander, G. Bleedless engines: The next generation of jet propulsion / G. Alexander, B. K. Thompson // *Aerospace America*. - 2005. - Vol. 43, Issue 9. - P. 26-29.

91. Walsh, P. P., Fletcher, P. "Gas Turbine Performance" / P. P. Walsh, P. Fletcher. – WILEY INDIA, 2010 p., 672 c .
92. Saravanamuttoo, H. I. H., Rogers, G. F. C., Cohen, H. "Gas Turbine Theory" / H. I. H. Saravanamuttoo, G. F. C. Rogers, H. Cohen. – Pearson, 2017 p., 624 c.
93. Терещенко Ю. М., Кулик Н.С., Ластівка И. А., Волянська Л.Г, Терещенко Ю. Ю. “Теорія авіаційних триконтурних турбореактивних двигунів” / Ю. М. Терещенко, Н.С Кулик, И. А. Ластівка, Л.Г Волянська, Ю. Ю. Терещенко – м. Київ: НАУ друк, 2010 р., 116 с.
94. Терещенко Ю.Ю. “Аеротермогазодинамічна інтеграція багатоконтурного газотурбінного двигуна і мотогондולי авіаційної силової установки” / Ю. Ю. Терещенко – м. Київ: НАУ друк, 2019 р., 116 с
95. Терещенко Ю. М “Теорія теплових двигунів” / Ю. М. Терещенко – м. Київ: Вища школа, 2001 р., 381 с.
96. Horoshkova, L., Khlobystov, I., & Volkov, V. (2020). Modelling of resource flows in the Coal industry of Ukraine. *Geoinformatics: Theoretical and Applied Aspects*, 1-6. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2020geo069>
97. Snihur, V., Malashkevych, D., & Vvedenska, T. (2016). Tendencies of coal industry development in Ukraine. *Mining of Mineral Deposits*, 10(2), 1-8. <https://doi.org/10.15407/mining10.02.001>
98. Countries & Regions: Ukraine. (2024). Paris, France: International Energy Agency. Retrieved from: <https://www.iea.org/countries/ukraine/energy-mix>
99. Petlovanyi, M.V., Malashkevych, D.S., Sai, K.S., & Stoliarska, O.V. (2023). Ecological-economic aspects of mining thin coal seams in the Western Donbas. *Journal of Geology, Geography and Geoecology*, 32(3), 569-580. <https://doi.org/10.15421/112351>
100. Novitskyi, R., Masiuk, O., Napich, H., Pavlychenko, A., & Kovalenko, V. (2023). Assessment of coal mining impact on the geoecological transformation of the Emerald network ecosystem. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 6, 107-112. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2023-6/107>
101. Sai, K., & Petlovanyi, M. (2023). Conditions and issues of accumulation of mining waste in large mining regions of Ukraine. *Proceedings of the International Scientific Conference “Modern Science: Global Trends, Technologies and Innovations”*, 125-129. Riga, Latvia: Baltija Publishing. <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-354-5-34>
102. Kramchaninova, M.D., & Fot, V.O. (2018). Use of secondary resources as a means of ensuring the environmental and economic efficiency of coal enterprises. *BusinessInform*, 10, 165-170.
103. Movchan, M.I., & Akimov, D.M. (2011). Use of mine waste rocks of the Lviv-Volyn coal basin in road construction. *Theory and Practice of Construction*, 697, 75-78.

104. Mnukhin, A.H., & Mnukhina, N.O. (2017). Improvement of the ecology of the industrial area by processing waste heaps. *Ecological Sciences*, 1-2, 93-99.
105. Mnukhin, A.H., Mnukhina, N.O., & Gituliar, A.A. (2018). Processing of waste heaps of coal mines by new environmentally friendly methods. *Ecological Sciences*, 1(20), 30-33.
106. Khabotova, E., Ihnatenko, M., Hraivoronska, I., & Kaliuzhna, Iu. (2020). Coal mining waste as raw material for the construction industry. *Petroleum and Coal*, 62(3), 1112-1120.
107. Hrinchenko, O., & Yushin, O. (2019). Potential of mining waste recycling in Ukraine. *Monitoring*, 2019, 1-5. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201903172>
108. Waste disposal processing. (2024). Retrieved from: <http://www.coalenergy.com.ua/company/business/>
109. Peck, F. (2009). Risk assessment in the Donetsk basin (mine closure and waste dumps). Donetsk: Unep Grid Arendal, 173 p.
110. Thang, N.C., Tuan, N.V., Hiep, D.N., & Thang, V.M. (2020). The potential use of waste rock from coal mining for the application as recycled aggregate in concrete. *Proceedings of the International Conference on Innovations for Sustainable and Responsible Mining*, 550-561. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-60839-2\\_29](https://doi.org/10.1007/978-3-030-60839-2_29)
111. Taha, Y., Benzaazoua, M., Hakkou, R., & Mansori, M. (2017). Coal mine wastes recycling for coal recovery and eco-friendly bricks production. *Minerals Engineering*, 107, 123-138. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2016.09.001>
112. Haibin, L., & Zhenling, L. (2010). Recycling utilization patterns of coal mining waste in China. *Resources, Conservation and Recycling*, 54(12), 1331-1340. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2010.05.005>
113. Cañibano, J.G. (1995). Latest developments in the utilization of coal mining wastes. *Coal Science and Technology*, 24, 1629-1632. [https://doi.org/10.1016/S0167-9449\(06\)80123-0](https://doi.org/10.1016/S0167-9449(06)80123-0)
114. Nazarbek, U., Abdurazova, P., Nazarbekova, S., Kambatyrov, M., & Raiymbekov, Y. (2021). Coal mining waste is a valuable secondary raw material. *Rasayan Journal of Chemistry*, 14(04). <https://doi.org/10.31788/rjc.2021.1446416>
115. Quaranta, N., Caligaris, M., López, H., Unsen, M., Carrasco, M., Grether, R., Suarez, M., & Beltramini, L. (2007). Waste from the coal extraction process as raw material for the construction industry. *Ecosystems and Sustainable Development VI*, 483-492. <https://doi.org/10.2495/eco070451>
116. García Giménez, R., Vigil de la Villa, R., & Frías, M. (2016). From coal-mining waste to construction material: a study of its mineral phases. *Environmental Earth Sciences*, 75(6), 478. <https://doi.org/10.1007/s12665-016-5494-8>

117. Gawor, Ł. (2014). Coal mining waste dumps as secondary deposits – examples from the Upper Silesian Coal Basin and the Lublin Coal Basin. *Geology, Geophysics & Environment*, 40(3), 285. <https://doi.org/10.7494/geol.2014.40.3.285>
118. Kien, T.T., & Lanh, P.T.V. (2021). Utilization of recycled coal mining waste for road foundation layers in Vietnam. *International Journal of GEOMATE*, 21(87), 11-18. <https://doi.org/10.21660/2021.87.j2229>
119. Santos, C.R.D., Tubino, R.M.C., & Schneider, I.A.H. (2015). Mineral processing and characterization of coal waste to be used as fine aggregates for concrete paving blocks. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, 8, 14-24.
120. Fecko, P., Tora, B., & Tod, M. (2013). 3 – Coal waste: Handling, pollution impacts and utilization. *The Coal Handbook: Towards Cleaner Production*, 63-84. <https://doi.org/10.1533/9781782421177.1.63>
121. Jahandari, S., Tao, Z., Chen, Z., Osborne, D., & Rahme, M. (2023). 4 – Coal wastes: Handling, pollution, impacts, and utilization. *The Coal Handbook: Towards Cleaner Production*, 97-163. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-824327-5.00001-6>
122. Eterigho-Ikelegbe, O., Harrar, H., & Bada, S. (2021). Rare earth elements from coal and coal discard – A review. *Minerals Engineering*, 173, 107187. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2021.107187>
123. Ribeiro, J., & Flores, D. (2021). Occurrence, leaching, and mobility of major and trace elements in a coal mining waste dump: The case of Douro Coalfield, Portugal. *Energy Geoscience*, 2(2), 121-128. <https://doi.org/10.1016/j.engeos.2020.09.005>
124. Куличенко В.В. Метод адаптивного воздействия и система комплексной фототерапии с микропроцессорным управлением, Диссертация на соискание уч. степени канд.тех.наук. –Харьков,2012, -167 с.
125. Кизилова Н.Н., Коробов А.М. Механизмы влияния низкоинтенсивного оптического излучения на систему микроциркуляции (обзор)//Фотобіологія та експериментальна фотомедицина, 1, 2 2016.-С.75-95.
126. Карандашов В.И., Петухов Е.Б., Зродников В.С. Фототерапия. М.: Медицина. – 2001. – 159 с.
127. Barton J.K., Hammer D.X., Prefer T.J., et al. Simultaneous irradiation and imaging of blood vessels during pulsed laser delivery. // *Lasers in Surg. Med.* –1999. – v.24. – P. 236–243.
128. Wu Ch.-Sh., Hu S. Ch.-S., Lan Ch.-Ch., et al. Lowenergy helium-neon laser therapy induces repigmentation and improves the abnormalities of cutaneous microcirculation in segmental-type vitiligo lesions. // *J. Med. Sci.* –2008. –v.24,N4. – P.180–189.
129. Agha-Hosseini F., Moslemi E., Mirzaii-Dizgah I. Comparative evaluation of low-level laser and CO2 laser in treatment of patients with oral lichen plan us. // *Int. J. Oral Maxillofac Surg.* – 2012. – v.41. – P.1265–1269.

130. Freddo A.L., Rodrigo S.M., Massotti F.P., et al. Effect of low-level laser therapy after implantation of poly-Llactic/ polyglycolic acid in the femurs of rats. // *Lasers Med. Sci.* – 2009. – v.24. – P.721–728.
131. Karu T. Photobiology of low-power laser effects. // *Health Phys.* – 1989. – v.56.– P.691–704.
132. Pinheiro A.L. Advances and perspectives on tissue repair and healing.// *Photomed. Laser Surg.* – 2010. – v.27.– P.833–836.
133. Tsai Sh.-Ru, Yin R., Huanga Y.-Y., et al. Low-level light therapy potentiates NPe6-mediated photodynamic therapy in a human osteosarcoma cell line via increased ATP. // *Photodiagn. Photodyn. Therapy.* – 2015. – v.12. – P.123–130.
134. Гейниц А. В. Внутривенное лазерное облучение крови / А. В. Гейниц, С. В. Москвин, А. А. Ачиллов. — Москва ; Тверь : Триада, 2012. — 334 с. : — (Основы лазерной терапии).
135. Weber, MH; Fussgдnger-May TW (2007). “Intravenous laser blood irradiation”. *German Journal of Acupuncture and related Techniques.*50(3):12-23.
136. Москвин С. В. Эффективность лазерной терапии (Эффективная лазерная терапия. Том 2). Vol. 2. — М.-Твер: Triada, 2014. — 896 p.
137. Петров А.В., Волчков В.А., Давыденко Т.Е. Применение внутрисосудистого лазерного облучения крови в комплексной терапии ишемической болезни сердца у больных пожилого и старческого возраста. Регионарное кровообращение и микроциркуляция – 2006..-N 2.-С.32-36.
138. Vetchinnikova O.N., Piksin I.N., Kalinin A.P. Extracorporeal ultraviolet blood irradiation in medicine. — М.: Publisher E. Razumova, 2002. — P. 263.
139. Harrington James, Li Junheng. Biomedical optics and lasers: diagnostics and treatment: 16–18 September 1998, Beijing, China. — Bellingham, Washington : SPIE, 1998.
140. Schwartz, SO; Kaplan SR; Stengle J; Stevenson FL (1952). “Ultraviolet Irradiation of Blood in Man”. *JAMA.* 149 (13): 1180-3.
141. Knott, E.K. (1948). “Development of ultraviolet blood irradiation”. *American Journal of Surgery.* 76 (2): 165—171.
142. Med-solar.ru.khirurgiya. медицинский справочник, электронный ресурс
143. Havlicek H. Die Behandlung eitrigen Prozesse mit Reinjektion ultraviolettbestrahlten Biutes und Eiters / H.Havlicek // *Arch. КИп. Chir.* 1934. - Bd.18.-S.102-104.
144. Onley R. Treatment of Hypoxemia. A Preliminary Reports on 21 Cases / R.Onley,A.Grez//*Abd.Surg.*1970.-Vol.12,№3.-P.45-46.

145. Сидельковская Э.И. Лечение септических заболеваний облученной УФ лучами кровью. //Акушерство и гинекология.-1941,-№7-№8-С.14-15.
146. Поташов Л.В. с сотр. Ультрафиолетовое облучение аутокрови в условиях эксперимента. //Фотобиология животной клетки.Ленинград.-Наука, 1979.-С.223-228.
147. Поташов Л.В., Чеминова Р.В. Реинфузия облученной собственной крови хирургических больных// Вестник хирургии.1980.-Вып.125.№10.-С.144-146.
148. Котык А., Яначек К. Мембранный транспорт. М.: Мир, 1980.-338 с.
149. Алмазова Е.Б., Емец Б.Г., Бондаренко В.А., Перский Е.Э.Зависимость величины изменения толщины примембранного водного диффузионного слоя эритроцита от длины волны облучающего света. Вісник Харківського університету № 716. Біофізичний вісник. 2005. Вип. 2 (16). С 53-56.
150. Алмазова Е.Б., Емец Б.Г. О механизме влияния излучения газоразрядной ртутной ультрафиолетовой лампы на толщину примембранного водного слоя эритроцитов человека. Біофізичний вісник. – 2008. – вип. 21 (2). – С. 88-94.
151. Алмазова Е.Б., Емец Б.Г. Белоус О.И. Малахов В.А., Носатов А.В., Сиренко С.П, Фисун А.И. Роль КВЧ излучения в повышении биологической активности крови. Радіофізика та електроніка. – 2008, № 3. – С. 556-561.
152. Москвин С.В. Эффективность лазерной терапии /Москвин С.В.-М.: НПЛЦ «Техника», 2003, 256 с.
153. Справочник химика 21. (электронный ресурс)
154. Bilan, T.; Kaplin, M.; Makarov, V.; Perov, M.; Novitskii, I.; Zaporozhets, A.; Havrysh, V.; Nitsenko, V. The Balance and Optimization Model of Coal Supply in the Flow Representation of Domestic Production and Imports: The Ukrainian Case Study. *Energies* 2022, 15, 8103. <https://doi.org/10.3390/en15218103>
155. A future without coal: how will Ukraine fulfill the promise it made in Glasgow? [Electronic resource]. - Access mode: <https://www.radiosvoboda.org/a/tes-energetyka-reformy-es-vugillya/31553015.html>.
156. Lund, H.; Arler, F.; Østergaard, P.A.; Hvelplund, F.; Connolly, D.; Mathiesen, B.V.; Karnøe, P. Simulation versus Optimisation: Theoretical Positions in Energy System Modelling. *Energies* 2017, 10, 840. <https://doi.org/10.3390/en10070840>
157. Babak, V. P.; Kulyk, M. M. Increasing the Efficiency and Security of Integrated Power System Operation Through Heat Supply Electrification in Ukraine. *Science and Innovation* 2023, 19(5), 100-116. <https://doi.org/10.15407/scine19.05.100>
158. Каплін М.І., Макаров В.М., Білан Т.Р. Балансово-оптимізаційна модель взаємодії енергетики з паливними галузями ПЕК України з урахуванням європейських екологічних норм. Проблеми загальної енергетики. 2018, 1(52). 5–11. <https://doi.org/10.15407/pge2018.01.005>



159. Макаров В.М. Математична модель оптимізації технологічного розвитку вуглевидобування в Україні. Проблеми загальної енергетики, 2017, 1(48). С. 16-23.
160. Макаров В.М., Каплін М.І., Перов М.О., Врахування екологічних обмежень при моделюванні розвитку вугільної галузі. Проблеми загальної енергетики. 2019. 4(59). 36-44. <https://doi.org/10.15407/pge2019.04.036>
161. Макаров В.М., Білан Т.Р., Каплін М.І. Математичні моделі оптимізації обсягів постачання вугілля в економіку країни з урахуванням вимог енергетичної безпеки. Економічна безпека національного енергетичного сектору в умовах глобалізації: колективна монографія / За заг. ред. О.Л. Гальцевої. – Запоріжжя: Видавничий дім «Гельветика», 2020. – С. 88-104.
162. Макаров В.М. Прогнозування розвитку вугільної галузі з урахуванням екологічних обмежень. *Economic Development: Global Trends and National Peculiarities*. – Collective monograph. – Poland: Baltija Publishing, 2020. – 100-118. ISBN 978-9934-588-61-7. <https://doi.org/10.30525/978-9934-588-61-7-8>
163. Макаров В., Каплін М., Білан Т., Перов М. Прогнозування обсягів видобутку вугілля в Україні. Системні дослідження в енергетиці. 2023. 1(72). 35-45. <https://doi.org/10.15407/srenergy2023.01.035>
164. Makarov V., Kaplin M., Perov M., Bilan T., Maliarenko O.: Optimization of Coal Products Supply for the Power Industry and the Country's Economy. In: Zaporozhets A. (eds) *Systems, Decision and Control in Energy V. Studies in Systems, Decision and Control*, Springer, Cham. 2023. vol 481. P. 87-98. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-35088-7\\_6](https://doi.org/10.1007/978-3-031-35088-7_6)
165. Dychko, A. (2007). Thin coal seams, their role in the resource base of Poland. Technical, technological and economic aspects of coal mining from thin seams, *International Mining Journal*, 81-87. [Electronic resource]. - Access mode: <https://doi.org/10.1201/noe0415436700.ch10>
166. Novoseltsev, O., Kovalko, O., Evtukhova, T. Cross-border cooperation of energy service companies as a factor enhancing energy and economic safety. *Energy Efficiency Improvement of Geotechnical Systems - Proceedings of the International Forum on Energy Efficiency*, 2013.
167. Makarov, V., Kaplin, M., Bilan, T., Perov, M. Modeling the coal industry technological development considering environmental restrictions. *Systems, Decision and Control in Energy II. Studies in Systems, Decision and Control*. 2021. Vol. 346. P. 153-166. Springer, Cham. ISSN 21984182. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-69189-9>
168. Макаров В., Перов М. Оцінка перспективності діючих вуглевидобувних підприємств. Системні дослідження в енергетиці. 2023. 2(73). 18-29. <https://doi.org/10.15407/srenergy2023.02.018>

169. Shulzhenko S., Kostyukovskyi B., Maliarenko O., Makarov V., Bilenko M.: Thermal Power Plants' Coal Stock Short Term Projection Method for Ensuring National Energy Security. In: Zaporozhets A. (eds) Systems, Decision and Control in Energy IV. Studies in Systems, Decision and Control, Springer, Cham. 2023. vol 454. P. 279-289. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-22464-5\\_16](https://doi.org/10.1007/978-3-031-22464-5_16)
170. Schnitzenbaumer, B., Arendt, E.K. (2014). Brewing with up to 40% unmalted oats (*Avena sativa*) and sorghum (*Sorghum bicolor*): a review. *Journal of The Institute of Brewing*, 120, 315-330.
171. Соц, С.М., Кустов, І.А. (2015). Особливості технологічних властивостей і хімічного складу голозерного вівса сорту «Саломон». *Харчова наука і технологія*, № 2, 103-108.
172. Leszczyńska D, Wirkijowska A, Gasiński A, Średnicka-Tober D, Trafiałek J, Kazimierzak R. (2023). Oat and Oat Processed Products-Technology, Composition, Nutritional Value, and Health. *Applied Sciences*, 13(20):11267.
173. Leszczyńska, D. (2021). Potential use of oats. *Przegląd Zbozowo-Młynarski*, 64, 39-41.
174. Kosiv, R. (2023). Dietary fibers: structure, properties, application in soft drink technology. Science, technology and innovation in the modern world: Scientific monograph. Riga, Latvia, Baltija Publishing.
175. Kosiv, R. (2023). Oat gum: structure, properties, production, application in the food industry. *Grain Products and Mixed Fodder's*, 23 (2, 90): 16-19.
176. Klose C, Thiele F, Arendt EK. (2010). Changes in the protein profile of oats and barley during brewing and fermentation. *J Am Soc Brew Chem.*, 68(2):119-124.
177. Cadenas, R., Caballero, I., Nimubona, D., & Blanco, C. A. (2021). Brewing with Starchy Adjuncts: Its Influence on the Sensory and Nutritional Properties of Beer. *Foods*, 10(8), 1726.
178. Rydzak, L., Vasiukov, K., Guz, T., Domin, M., Kovalyshyn, S. & Kiczorowski, P. (2024). Effect of the Addition of Selected Unmalted Raw Materials to Barley Malt on Selected Parameters of Malt Extracts. *Agricultural Engineering, Sciendo*, 28 (1), 185-194.
179. Zdaniewicz, M., Pater, A., Knapik, A.A., & Duliński, R. (2021). The effect of different oat (*Avena sativa* L) malt contents in a top-fermented beer recipe on the brewing process performance and product quality. *Journal of Cereal Science*, 101.
180. Kosiv, R. (2021). Comparison of the hydrocolloids application efficiency for stabilizing the foam of beer. *ScienceRise*, (6), 25-30.
181. Salamon, A., Kowalska, H., Ignaczak, A., Marzec, A., Kowalska, J., & Szafrńska, A. (2023). Characteristics of Oat and Buckwheat Malt Grains for Use in the Production of Fermented Foods. *Foods*, 12(20), 3747.

182. Філінська Т., Шевченко В., Філінська А., Павлюк С. & Суха, І. (2023). Дослідження властивостей багатокомпонентних сумішей борошна / Технічні науки та технології, (1 (31), 117–125. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2023-1\(31\)-117-125](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2023-1(31)-117-125).
183. Філінська Т., Філінська А. & Павлюк С. (2023). Дослідження властивостей функціональних добавок рослинного походження для майонезної продукції / Технічні науки та технології, (2 (32), 282–288. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2023-2\(32\)-282-288](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2023-2(32)-282-288).
184. Evanuarini H. The use of watermelon rind flour as stabilizer for reduced fat mayonnaise [Text] / H. Evanuarini, D. Amertaningtyas, D. Utama, A. Safitri // Jurnal Ilmu dan Teknologi Hasil Ternak. – 2020. – Vol. 15, № 3. – P. 172-182. <https://doi.org/10.21776/ub.jitek.2020.015.03.5>.
185. Анан'єва В. В., Белінська А. П., Кричківська Л. В., Петров С. О., Петрова І. А. Дослідження технологічних властивостей порошку шкірки винограду як функціонального інгредієнту майонезного соусу / Технологічний аудит та резерви виробництва – 2016. – №6 (3(32), С. 36–41. <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2016.86540>.
186. Філінська Т.Г. Харчові полісахариди. Виробництво, властивості, використання. Навчальний посібник / Т.Г. Філінська, О.В. Черкаков, А.О. Філінська. – Д: ДВНЗ УДХТУ, 2017. – 253 с.
187. Хомічак Л. М., Петрова Ж. О., Кузнецова І. В., Шейко Т. В., Ярмолук М. А. Інноваційні технології каротиновмісних харчових продуктів / XIV Міжнародна конференція «Стратегія якості в промисловості і освіті» (4-7 червня, 2018 р.), м. Варна, Болгарія. 2018. Т.1 с. 130-134.
188. Філінська, Т. ., & Філінська, А. (2024). Рецептні інновації як складові трансформації ринку майонезної продукції. Технічні науки та технології, (1 (35), 212–224. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2024-1\(35\)-212-224](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2024-1(35)-212-224)
189. Чоні І. В., Суткович Т. Ю. (2015) Використання природних стабілізаторів у технології емульсійної продукції / Науковий вісник Полтавського університету економіки і торгівлі, 1(73), с. 54–59. [http://nbuv.gov.ua/UJRN/nvpuettn\\_2015\\_1\\_8](http://nbuv.gov.ua/UJRN/nvpuettn_2015_1_8).
190. Чоні І. В., Коваленко Н. П. (2008) Розробка нової емульсійної продукції на основі рослинної сировини / Науковий вісник Полтавського університету економіки і торгівлі, 1, с. 108–111. [http://nbuv.gov.ua/UJRN/nvpuettn\\_2008\\_1\\_24](http://nbuv.gov.ua/UJRN/nvpuettn_2008_1_24).
191. Романовська, Т., Романовський, Н. (2022). Властивості майонезу, збагаченого білком / Науковий вісник Міжнародної асоціації науковців. Серія: економіка, управління, безпека, технології, 1(3). <https://doi.org/10.56197/2786-5827/2022-1-3-8>.

192. Nidhal H. A. Characteristics of reduced fat mayonnaise using pumpkin flour (*Cucurbita moschata*) as fat replacer [Text] / H. A. Nidhal, H. Evanuarini, I. Thohari // *Environmentally Sustainable Animal Industry. International conference. 2nd 2021.* – Malang, Indonesia, 2021.-P.335-338. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202233500017>.
193. Nemirich, O., Lyavinets, G., Vinnikov, V., & Mikhailenko, V. (2018). Theoretical preconditions of development technology souss with reduced calority. *Scientific Messenger of LNU of Veterinary Medicine and Biotechnologies. Series: Food Technologies*, 20(85), 90-94. <https://doi.org/10.15421/nvlvet8517>.
194. Розширення асортименту низькокалорійних майонезів і салатних соусів з функціональними добавками. Філінська Т.Г., Шевченко В.В., Філінська А.О. // Міжнародна наукова інтернет-конференція «Інформаційне суспільство: технологічні, економічні та технічні аспекти становлення. Випуск 73», м. Тернопіль, Україна – м. Переворськ, Польща, 8-9 грудня 2022; С. 202 – 204. <http://www.konferenciaonline.org.ua/ua/article/id-829/>.
195. Філінська, Т. ., Філінська, А., & Фурсова, Л. . (2024). Дослідження властивостей продуктів перероблення цитрусових як добавок для майонезних соусів. *Технічні науки та технології*, (1 (35), 225–231. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2024-1\(35\)-225-231](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2024-1(35)-225-231)
196. Hydrocolloids as emulsifiers and emulsion stabilizers. Eric Dickinson // *Food Hydrocolloids. Volume 23, Issue 6, August 2009, Pages 1473-1482.* <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2008.08.005>.
197. Citrus fiber for the stabilization of O/W emulsion through combination of Pickering effect and fiber-based network. Jun-ru Qi, Li-wen Song, Wei-qi Zeng, Jin-song Liao // *Food Chemistry. Volume 343, 1 May 2021, 128523.* <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.128523>.
198. Physicochemical properties of a dressing-type o/w emulsion as influenced by orange pulp fiber incorporation. Nino T. Chatsisvili, Ioannis Amvrosiadis, Vassilis Kiosseoglou. // *LWT - Food Science and Technology. Volume 46, Issue 1, April 2012, Pages 335-340.* <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2011.08.019>.
199. Emulsifying and stabilizing properties of functionalized orange pulp fibers. J. Wallecan, C. McCrae, S.J.J. Debon, J. Dong, J. Mazoyer. // *Food Hydrocolloids. Volume 47, May 2015, Pages 115-123.* <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2015.01.009>
200. Bioactive Substances, Heavy Metals, and Antioxidant Activity in Whole Fruit, Peel, and Pulp of Citrus Fruits. Anna Czech, Agnieszka Malik, Bożena Sosnowska, Piotr Domaradzki // *International Journal of Food Science. Volume 2021.* <https://doi.org/10.1155/2021/6662259>.
201. Діючі АЕС. Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.uatom.org/zagalni-vidomosti#> .

202. Pyrozhkov S.I. About the National Report of the NAS of Ukraine «National resilience of Ukraine: hybrid threats challenge response and prevention strategy». *Visn. Nac. Akad. Nauk Ukr.* 2022. (5): 45-55. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://doi.org/10.15407/visn2022.05.045> .
203. МАГАТЕ: Атомна генерація може подвоїти потужність до 2050 року. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://infoatom.news/2021/07/27/pris>
204. BP Energy outlook. 2035 / British Petroleum. URL: [https://www.ief.org/\\_resources/files/events/ief-lecture--bp-energy-outlook-2035/energy-outlook-2035-presentation.pdf](https://www.ief.org/_resources/files/events/ief-lecture--bp-energy-outlook-2035/energy-outlook-2035-presentation.pdf)
205. BP Energy outlook. 2018 / British Petroleum. URL: <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/energy-outlook/bp-energy-outlook-2018.pdf>
206. Nuclear Power 2023 end of year updates / World Nuclear Industry Status Report 2023. URL: <https://www.worldnuclearreport.org/IMG/pdf/wnisr2023-endofyear-updates.pdf>
207. АТ «НАЕК Енергоатом». Основні показники діяльності за 2021 рік. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://old.energoatom.com.ua/production-indicators.html>.
208. Україна входить до топ-10 лідерів у сфері ядерної енергетики. 2019 Інформаційне агентство ASPI. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://aspi.com.ua/news/suspilstvo/ukraina-vkhodit-do-top-10-lideriv-u-sferi-yadernoi-energetiki-pavlo-fuks#gsc.tab=0> .
209. Державна інспекція ядерного регулювання України. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://snriu.gov.ua/>.
210. Державні гігієнічні нормативи. Норми радіаційної безпеки України (НРБУ-97) [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://document.ua/normi-radiacii-noyi-bezpeki-ukrayini-nrbu-97--nor5265.html>.
211. Про використання ядерної енергії та радіаційну безпеку: закон України, 08 лют. 1995 р. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://zakon1.rada.gov.ua/laws/show/39/95-вр>.
212. Про дозвільну діяльність у сфері використання ядерної енергії: закон України, 11 січ. 2000 р. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://zakon1.rada.gov.ua/laws/show/1370-14>.
213. Про затвердження Вимог щодо визначення розмірів і меж зони спостереження атомної електричної станції: наказ Державної інспекції ядерного регулювання України та Міністерства охорони здоров'я України, 17 листопада 2011 р. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://zakon1.rada.gov.ua/laws/show/z1343-11>.

214. Про затвердження державних санітарних правил «Основні санітарні правила забезпечення радіаційної безпеки України»: наказ Міністерства охорони здоров'я України, 02 лютого 2005 р. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://zakon1.rada.gov.ua/laws/show/z0552-05>.
215. Про затвердження Загальних положень безпеки атомних станцій: наказ Державного комітету ядерного регулювання України, 19 листопада 2007 р. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://zakon1.rada.gov.ua/laws/show/z0056-08>.
216. Про затвердження Державних гігієнічних нормативів «Допустимі рівні вмісту радіонуклідів  $^{137}\text{Cs}$  та  $^{90}\text{Sr}$  у продуктах харчування та питній воді (ДР – 97)»: наказ Міністерства охорони здоров'я, 08 травня 2008 р. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://zakon1.rada.gov.ua/laws/show/z0845-06>.
217. Про затвердження Плану реагування на радіаційні аварії: наказ Державного комітету ядерного регулювання України та Міністерства з питань надзвичайних ситуацій та у справах захисту населення від наслідків Чорнобильської катастрофи, 17 травня 2004 р. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://zakon1.rada.gov.ua/laws/show/z0720-04>.
218. Про правовий режим території, що зазнала радіоактивного забруднення внаслідок Чорнобильської катастрофи: закон України, 28 лютого 1991 р. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://zakon1.rada.gov.ua/laws/show/791a-12>.
219. Про схвалення Концепції національної екологічної політики України на період до 2020 року: розпорядження КМУ, 17 жовтня 2007 р. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/880-2007-p>.
220. Про схвалення Концепції реалізації державної політики у сфері розвитку діяльності в окремих зонах радіоактивного забруднення внаслідок Чорнобильської катастрофи: розпорядження КМУ, 18 липня 2012 р. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/535-2012-p>.
221. Запорізька АЕС [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.uatom.org/zagalni-vidomosti/diyuchi-aes-ukrainy/zaporigiska-aes>.
222. Рівненська АЕС [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.uatom.org/zagalni-vidomosti/diyuchi-aes-ukrainy/rivenska-aes>.
223. Хмельницька АЕС [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.uatom.org/zagalni-vidomosti/diyuchi-aes-ukrainy/khmelniyska-aes>.
224. Південноукраїнська АЕС [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.uatom.org/zagalni-vidomosti/diyuchi-aes-ukrainy/yugno-ukrainska-aes>.

225. Катастрофа на Чорнобильській атомній електростанції / Д. М. Гродзинський // Енциклопедія Сучасної України [Електронний ресурс] / Редкол. : І. М. Дзюба, А. І. Жуковський, М. Г. Железняк [та ін.]; НАН України, НТШ. – К.: Інститут енциклопедичних досліджень НАН України, 2012. [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://esu.com.ua/article-11184>
226. 25 років Чорнобильської катастрофи. Безпека майбутнього. Національна доповідь України. К., 2011. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://chnpp.gov.ua/ua/uk/news/37-union/123-2011-11-24-12-00-48123>
227. Звіт проведення оцінки впливу на довкілля майданчика ВП «Рівненська АЕС». Книга 1. Друга редакція. 2018 рік. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [https://www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/themen/energie/kernenergie/verfahren/ukraine/uvp-rivne/eia-npprivne12\\_ua.pdf](https://www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/themen/energie/kernenergie/verfahren/ukraine/uvp-rivne/eia-npprivne12_ua.pdf)
228. Комплексна зведена програма підвищення безпеки енергоблоків АЕС України: звіт про екологічну оцінку від 30 верес. 2011 р. – К: ДП НАЕК «Енергоатом», 2011. – 341 с.
229. Енергетика: історія, сучасність і майбутнє. Книга 5. Електроенергетика та охорона навколишнього середовища. Функціонування енергетики в сучасному світі / Автор ідеї Світлана Григорівна Плачкова; вступ. сл. І. В. Плачков.– К.: Б.в., 2013. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://energetika.in.ua/ua/books/book-5/part-3/section-3/3-1>
230. Гродзинський Д. М. Радиобіологія: підручн. / Д. М. Гродзинський. – К.: Либідь, 2000. – 448 с.
231. Про затвердження державних санітарних норм і правил захисту населення від впливу електромагнітних випромінювань: наказ Міністерства охорони здоров'я України, 01 серпня 1996 р. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://zakon1.rada.gov.ua/laws/show/z0488-96>.
232. Про оцінку соціальних та екологічних впливів на проект будівництва повітряної лінії 750 кВ Рівненська АЕС – Київська з розширенням підст. 750 кВ «Київська» та заходами ПЛ 750 кВ Хмельницька АЕС – Чорнобильська АЕС: звіт [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [http://www.ukrenergo.energy.gov.ua/ukrenergo/control/uk/publish/category?cat\\_id=33495](http://www.ukrenergo.energy.gov.ua/ukrenergo/control/uk/publish/category?cat_id=33495).
233. Національна доповідь про стан навколишнього природного середовища в Україні у 2021 році. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://mepr.gov.ua/wp-content/uploads/2023/01/Natsdopovid-2021-n.pdf>
234. Гудков І.М., Кашпаров В.О., Паренюк О.Ю. Радіоекологічний моніторинг: навчальний посібник. Київ, 2019. 188 с
235. Про землеустрій: закон України, 22 трав. 2003 р. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/858-15/page2>

236. Чапля Є. Я. Чинники процесу міграції радіонуклідів у ґрунті / Є. Я. Чапля, Г. Т. Лянце, О. Ю. Чернуха, В. Є. Гончарук // Екологічна безпека та природокористування: зб. наук. пр. / Київ. нац. ун-т буд-ва і архіт. – Київ: Юстон, 2017. – Вип. 24. – С. 7–17.
237. Hu Q.-H. Sources of anthropogenic radionuclides in the environment: a review / Q.-H. Hu, J.-Q. Weng, J.-S. Wang // Journal of Environmental Radioactivity. – 2010. – №101 (6). – P. 426 – 437.
238. Дець Т. І. Дослідження міграційних процесів радіонуклідів в ґрунтах та організація забруднених територій з використанням ГІС-технологій / Т. І. Дець // Вісн. НУВГП: зб. наук. праць. – 2008. – Вип. 4 (44). – С. 228 – 233.
239. Дмитрів О.П. Особливості організації території довкілля АЕС з врахуванням радіаційного забруднення (на прикладі Рівненської АЕС) / О.П.Дмитрів // Інженерна геодезія: наук.-техн. зб. Вип. 42 – К.: КНУБА, 2000. – С.53–57.
240. П'ятнадцять років Чорнобильської катастрофи. Досвід подолання // Національна доповідь України. – К.: 2001. – 144 с.
241. Дець Т. І. Особливості впорядкування території 30-кілометрової зони спостережень атомних електричних станцій (на прикладі Хмельницької АЕС) / Т. І. Дець, О. П. Дмитрів // Геодезія, картографія і аерофотознімання: міжвід. наук.-тех. зб. – 2011. – Вип. 75. – С. 121 – 126.
242. Дець Т. І. Аналіз факторів, що впливають на розвиток території довкілля атомних електричних станцій (на прикладі Хмельницької АЕС) / Т. І. Дець, О. П. Дмитрів // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. – 2012. – Вип. I (23). – С. 289 – 293.
243. Дець Т. І. Оцінка факторів, що впливають на розвиток території довкілля Хмельницької АЕС, за умов нечіткої вихідної інформації / Т. І. Дець // Вісн. НУВГП: зб. наук. пр. – 2012. – Вип. 1 (57). – С. 241 – 247.
244. Іванов Ю. О. Імобілізація  $^{90}\text{Sr}$  і  $^{137}\text{Cs}$  у контрастних за властивостями ґрунтах / Ю. О. Іванов, І. М. Малоштан, І. В. Кулик, В. В. Павлюченко // Ядерна фізика та енергетика. – 2014. – Т.15. №3. – С. 277–284.
245. Kirchner G. Vertical migration of radionuclides in undisturbed grassland soils / G. Kirchner, F. Strebl, P. Bossew // Journal of Environmental Radioactivity. – 2009. – №100 (9). – P. 716 – 720.
246. Кашпаров В.О. Формування і динаміка радіоактивного забруднення навколишнього середовища під час аварії на Чорнобильській АЕС та в післяаварійний період / В.О. Кашпаров // Чорнобиль. Зона відчуження [зб. наук. праць]. – К.: Наукова думка, 2001. – С. 11–46.
247. Іванов Ю. О. Динаміка перерозподілу радіонуклідів у ґрунтах і рослинності / Ю. О. Іванов // Чорнобиль. Зона відчуження: зб. наук. пр. – К.: Наукова думка, 2001. – С. 47 – 76.



248. Хільчевський В. К. Концептуальна модель міграції стронцію-90 в підземні і поверхневі води зони відчуження Чорнобильської АЕС / В. К. Хільчевський, С. М. Курило // Регіональні екологічні проблеми: зб. наук. праць. – К.: Обрії, 2002. – С. 32 – 34.
249. Кравець О. П. Математичне моделювання вертикальної міграції довго живучих радіонуклідів у посівах / О. П. Кравець. // Наука. Чорнобиль-98: тези доп. науково-практ. конф. 1-2.04.1999 р. – 1999. – С. 113.
250. Прістер Б. С. Ведення сільськогосподарського і лісового господарства, а також водогосподарської діяльності на забруднених радіонуклідами територіях / Б. С. Прістер, Ю. О. Іванов, В. О. Кашпаров // Національна доповідь України «15 років Чорнобильської катастрофи. Досвід подолання». – К.: МНС України, 2001. – С. 7.5.1. – 7.5.3.
251. Дець Т. І. Міграційні процеси в ґрунтах та їх вплив на організацію забруднених територій / Т. І. Дець, І. М. Бялик // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. – 2007. Вип. 1 (13). – С. 284 – 289.
252. Дець Т. І. Міграційні процеси радіонуклідів в ґрунтах під впливом електромагнітного поля та їх вплив на організацію забруднених територій / Т. І. Дець, І.М. Бялик // Вісник НУВГП: зб. наук. праць. – 2007. – Вип. 4 (40). – С. 65 – 72.
253. Полевой определитель почв / Под ред. Н. И. Полулана. – К.: Урожай, 1981. – 320 с.
254. Згуровський М. З. Численне моделювання поширення забруднень в навколишньому середовищі / М. З. Згуровський, В. В. Скошукий, В. К. Хрущ, М. М. Беляєв. – К.: Наукова думка, 1997. – 368 с.
255. Дець Т., Бухальська Т., Янчук О., Наконечна Ж. Концептуальна модель розвитку територій у зоні спостереження АЕС (на прикладі Хмельницької АЕС) / Т. Дець, Т. Бухальська, О. Янчук, Ж. Наконечна // Science and Education a New Dimension. Natural and Technical Sciences. (11), Issue: 96, 2016. – P. 47 – 51.
256. Бачишин Б.Д. Інженерна геодезія: навч. посіб. [Електронне видання]. Рівне: НУВГП, 2020. 196 с. ISBN 978-966-327-480-5.
257. Бевза І.О., Чадюк В.О. 3D сканери. Матеріали XII-ї науково-практичної конференції «Перспективні напрямки сучасної електроніки», КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. С. 103-108.
258. Soudarissanane S.S. The geometry of terrestrial laser scanning; identification of errors, modeling and mitigation of scanning geometry: doctoral thesis. 2016. 146 p. ISBN 978-94-6233-203-4.

259. Намінат О.С. Удосконалення методів геодезичного забезпечення моніторингу лінійних об'єктів в зонах впливу підземних гірничих робіт: дисертація. Національний університет «Львівська політехніка» МОН України, Львів, 2019. 197 с.
260. ДСТУ EN 60825-1:2019 Безпека лазерних виробів. Частина 1. Класифікація обладнання та вимоги (EN 60825-1:2014, IDT; IEC 60825-1:2014, IDT). [Чинний від 2021-01-01]. Технічний комітет «Безпека промислової продукції та засоби індивідуального захисту працюючих» (ТК 135). 2021. 95 с.
261. Намінат О.С. Аналіз факторів, що впливають на точність результатів вимірювань наземного лазерного сканера. *Wschodnioeuropejskie Czasopismo Naukowe (East European Scientific Journal) № 9 (37)*, 2018. С. 4-12.
262. Boehler, Wolfgang, Guido Heinz, and Andreas Marbs. «The potential of non-contact close range laser scanners for cultural heritage recording» *International archives of photogrammetry remote sensing and spatial information sciences 34.5/C7*. 2002. P. 430-436.
263. Дорошенко Ю.О., Нецадим В.О. Сценарій отримання початкової інформації про рельєфну поверхню елементу фасадного декору за допомогою лазерного сканування. Теорія та практика дизайну: зб. наук. праць. Архітектура та будівництво. Київ: НАУ, 2022. Вип. 25. С. 58-65.
264. Gikas, Vassilis. «Three-dimensional laser scanning for geometry documentation and construction management of highway tunnels during excavation» *Sensors 12.8*. (2012). P. 11249-11270.
265. Shusheng Bi, Chang Yuan, Chang Liu, Jun Cheng, Wei Wang, Yueri Cai. A survey of low-cost 3D laser scanning technology. *Applied Sciences*, 2021, 11 (9). P. 3938.
266. Hess Mona. 3D laser scanning. Digital techniques for documenting and preserving cultural heritage, 2017. P. 199-206.
267. Janßen J, Medic T, Kuhlmann H, Holst C. Decreasing the Uncertainty of the Target Center Estimation at Terrestrial Laser Scanning by Choosing the Best Algorithm and by Improving the Target Design. *Remote Sensing*. 2019; 11 (7):845. <https://doi.org/10.3390/rs11070845>
268. Сидоренко В.Д., Шолох М.В., Сергєєва М.П. Опрацювання даних лазерного 3D-сканування з використанням комплексних програми. *Гірничий вісник*, вип. 98, 2014. С. 142-147.
269. Сунак П. О., Синій С. В., Мельник Ю. А., Ксьоншкевич Л. М., Крантовська О. М., Орешкович Матіа. Реконструкція інженерних споруд та мереж, ландшафту на основі технології лазерного сканування. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*, 2022, Вип. 18. С. 147-161.

270. Батракова А.Г., Гунько І.С., Дорошко Є.В., Саркісян Г.С., Урдзік С. М. Особливості поєднання результатів лазерного 3D-сканування з різних станцій з використанням магнітних сфер. *Комунальне господарство міст*, 3 (184), С. 129-133. <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2024-3-184-129-133>
271. Батракова А.Г., Гунько І.С., Дорошко Є.В., Саркісян Г.С., Урдзік С. М. Технологія поєднання результатів лазерного 3D-сканування з різних станцій з використанням плоских марок. *Комунальне господарство міст*, 3 (184), С. 134-138. <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2024-3-184-134-138>
272. Батракова А.Г., Шелкова І.С., Дорошко Є.В., Саркісян Г.С., Урдзік С. М. Особливості технології наземного лазерного 3D-сканування для оцінки стану дорожнього покриття. *Вісник Харківського національного автомобільно-дорожнього університету*. 2024. Вип. 107. (прийнято до друку).
273. ДСТУ 8954:2019. Автомобільні дороги. Оцінювання рівня дефектності дорожнього одягу. Київ, 2021. 36 с.
274. Колб І., Процик М. Методика автоматичного виділення структурних ліній рельєфу з растрових ЦМР, створених за даними лазерного сканування. *Геодезія, картографія і аерофотознімання*, № 72. 2009. С. 69-74.
275. Ramachandraiah, S. T., Kumar, P., Pasupunuri, S. K., Shinganmakki, J. R. "Evaluation of Pavement Surface Distress Using Image Processing and Artificial Neural Network." *ASTM International. J. Test. Eval.*. July 2023. 51 (4): 2041-2056.
276. R. Kothai, N. Prabakaran, Y. V. Srinivasa Murthy, L. Reddy Cenkeramaddi, V. Kakani, "Pavement Distress Detection, Classification, and Analysis Using Machine Learning Algorithms: A Survey," in *IEEE Access*, vol. 12, 2024. pp. 126943-126960
277. Qureshi WS, Hassan SI, McKeever S, Power D, Mulry B, Feighan K, O'Sullivan D. An Exploration of Recent Intelligent Image Analysis Techniques for Visual Pavement Surface Condition Assessment. *Sensors*. 2022; 22 (22):9019.
278. Xian-Feng Han, Jesse S. Jin, Ming-Jie Wang, Wei Jiang, Lei Gao, Liping Xiao. A review of algorithms for filtering the 3D point cloud. *Signal Processing: Image Communication*. Vol. 57, 2017, Pp. 103-112.
279. P. Viola and M. Jones. Rapid object detection using a boosted cascade of simple features. In *Proceedings of the 2001 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. CVPR 2001*, volume 1, pages I–511–I–518, Kauai, HI, USA, 2001. IEEE Comput. Soc.
280. Jun Deng, Xiaojing Xuan, Weifeng Wang, Zhao Li, Hanwen Yao, and Zhiqiang Wang. A review of research on object detection based on deep learning. *Journal of Physics: Conference Series*, 1684(1):012028, November 2020.
281. Jiahuan Luo, Xueyang Wu, Yun Luo, Anbu Huang, Yunfeng Huang, Yang Liu, and Qiang Yang. *Real-World Image Datasets for Federated Learning*. 2019. Publisher: arXiv Version Number: 3.

282. Sameena Shah, S H Srinivasan, and Subhajit Sanyal. Fast object detection using local feature-based SVMs. In Proceedings of the 8th international workshop on Multimedia data mining (associated with the ACM SIGKDD 2007) - MDM '07, pages 1–5, San Jose, California, 2007. ACM Press.
283. Ivan Laptev. Improving object detection with boosted histograms. *Image and Vision Computing*, 27(5):535–544, April 2009.
284. Kai Kang, Hongsheng Li, Junjie Yan, Xingyu Zeng, Bin Yang, Tong Xiao, Cong Zhang, Zhe Wang, Ruohui Wang, Xiaogang Wang, and Wanli Ouyang. T-CNN: Tubelets With Convolutional Neural Networks for Object Detection From Videos. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 28(10):2896–2907, October 2018.
285. Syed Sahil Abbas Zaidi, Mohammad Samar Ansari, Asra Aslam, Nadia Kanwal, Mamoona Asghar, and Brian Lee. A survey of modern deep learning based object detection models. *Digital Signal Processing*, 126:103514, June 2022.
286. C.P. Papageorgiou, M. Oren, and T. Poggio. A general framework for object detection. In Sixth International Conference on Computer Vision (IEEE Cat. No.98CH36271), pages 555–562, Bombay, India, 1998. Narosa Publishing House.
287. Jianhang Wang, Sitan Jiang, Wenjie Song, and Yi Yang. A Comparative Study of Small Object Detection Algorithms. In 2019 Chinese Control Conference (CCC), pages 8507–8512, Guangzhou, China, July 2019. IEEE.
288. Zehang Sun, George Bebis, and Ronald Miller. Object detection using feature subset selection. *Pattern Recognition*, 37(11):2165–2176, November 2004.
289. Chengcheng Ning, Huajun Zhou, Yan Song, and Jinhui Tang. Inception Single Shot MultiBox Detector for object detection. In 2017 IEEE International Conference on Multimedia & Expo Workshops (ICMEW), pages 549–554, Hong Kong, Hong Kong, July 2017. IEEE.
290. Joseph Redmon, Santosh Divvala, Ross Girshick, and Ali Farhadi. You Only Look Once: Unified, Real-Time Object Detection. In 2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), pages 779–788, Las Vegas, NV, USA, June 2016. IEEE.
291. Shaoqing Ren, Kaiming He, Ross Girshick, and Jian Sun. Faster R-CNN: Towards Real-Time Object Detection with Region Proposal Networks. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 39(6):1137–1149, June 2017.
292. Jeong-ah Kim, Ju-Yeong Sung, and Se-ho Park. Comparison of Faster-RCNN, YOLO, and SSD for Real-Time Vehicle Type Recognition. In 2020 IEEE International Conference on Consumer Electronics - Asia (ICCE-Asia), pages 1–4, Seoul, Korea (South), November 2020. IEEE.
293. Ross Girshick. Fast R-CNN. In 2015 IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV), pages 1440–1448, Santiago, Chile, December 2015. IEEE.

294. Samiksha Choyal and Ajay Kumar Singh. An Acoustic based Roadside Symbols Detection and Identification using Faster RCNN and SSD. In 2020 International Conference on Emerging Trends in Communication, Control and Computing (ICONC3), pages 1–4, Lakshmanagarh, India, February 2020. IEEE.
295. Mohamed Shahud, Jigyasa Bajracharya, Prasong Praneetpolgrang, and Somrak Petcharee. Thai Traffic Sign Detection and Recognition Using Convolutional Neural Networks. In 2018 22nd International Computer Science and Engineering Conference (ICSEC), pages 1–5, Chiang Mai, Thailand, November 2018. IEEE.
296. Chloe Eunhyang Kim, Mahdi Maktab Dar Oghaz, Jiri Fajtl, Vasileios Argyriou, and Paolo Remagnino. A Comparison of Embedded Deep Learning Methods for Person Detection. 2018. Publisher: arXiv Version Number: 2.
297. Qi-Chao Mao, Hong-Mei Sun, Ling-Qun Zuo, and Rui-Sheng Jia. Finding every car: a traffic surveillance multi-scale vehicle object detection method. *Applied Intelligence*, 50(10):3125–3136, October 2020.
298. Ping Ping, Xiaohui Yang, and Zeyu Gao. A Deep Learning Approach for Street Pothole Detection. In 2020 IEEE Sixth International Conference on Big Data Computing Service and Applications (BigDataService), pages 198–204, Oxford, United Kingdom, August 2020. IEEE.
299. Zhao Yinghua, Tan Yu, and Liu Xingxing. Urban Street tree Recognition Method Based on Machine Vision. In 2021 6th International Conference on Intelligent Computing and Signal Processing (ICSP), pages 967–971, Xi'an, China, April 2021. IEEE.
300. Ren Liu and Ziang Ren. Application of Yolo on Mask Detection Task. In 2021 IEEE 13th International Conference on Computer Research and Development (ICCRD), pages 130–136, Beijing, China, January 2021. IEEE.
301. Chethan Kumar B., R. Punitha, and Mohana. YOLOv3 and YOLOv4: Multiple Object Detection for Surveillance Applications. In 2020 Third International Conference on Smart Systems and Inventive Technology (ICSSIT), pages 1316–1321, Tirunelveli, India, August 2020. IEEE.
302. Ehab Ur Rahman, Yihong Zhang, Sohail Ahmad, Hafiz Ishfaq Ahmad, and Sayed Jobaer. Autonomous VisionBased Primary Distribution Systems Porcelain Insulators Inspection Using UAVs. *Sensors*, 21(3):974, February 2021.
303. Chengjian Feng, Yujie Zhong, Yu Gao, Matthew R. Scott, and Weilin Huang. TOOD: Task-aligned One-stage Object Detection. In 2021 IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV), pages 3490–3499, Montreal, QC, Canada, October 2021. IEEE.
304. Licheng Jiao, Fan Zhang, Fang Liu, Shuyuan Yang, Lingling Li, Zhixi Feng, and Rong Qu. A Survey of Deep Learning-Based Object Detection. *IEEE Access*, 7:128837–128868, 2019.

305. Zhenyu Fang, Jinchang Ren, He Sun, Stephen Marshall, Junwei Han, and Huimin Zhao. SAFDet: A SemiAnchor-Free Detector for Effective Detection of Oriented Objects in Aerial Images. *Remote Sensing*, 12(19):3225, October 2020.
306. Wei Liu, Dragomir Anguelov, Dumitru Erhan, Christian Szegedy, Scott Reed, Cheng-Yang Fu, and Alexander C. Berg. SSD: Single Shot MultiBox Detector. In Bastian Leibe, Jiri Matas, Nicu Sebe, and Max Welling, editors, *Computer Vision – ECCV 2016*, volume 9905, pages 21–37. Springer International Publishing, Cham, 2016. Series Title: Lecture Notes in Computer Science.
307. Mark Sandler, Andrew Howard, Menglong Zhu, Andrey Zhmoginov, and Liang-Chieh Chen. MobileNetV2: Inverted Residuals and Linear Bottlenecks. In 2018 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, pages 4510–4520, Salt Lake City, UT, June 2018. IEEE.
308. Ángel Morera, Ángel Sánchez, A. Belén Moreno, Ángel D. Sappa, and José F. Vélez. SSD vs. YOLO for Detection of Outdoor Urban Advertising Panels under Multiple Variabilities. *Sensors*, 20(16):4587, August 2020.
309. Lovchik, C. S., and Myron A. Diftler. "The robonaut hand: A dexterous robot hand for space." *Proceedings 1999 IEEE international conference on robotics and automation (Cat. No. 99CH36288C)*. Vol. 2. IEEE, 1999.
310. Shimoga, Karun B. "Robot grasp synthesis algorithms: A survey." *The International Journal of Robotics Research* 15.3 (1996): 230-266.
311. Ke, Xinda, Anjie Jiang, and Ning Lu. "Load profile analysis and short-term building load forecast for a university campus." 2016 IEEE Power and Energy Society General Meeting (PESGM). IEEE, 2016.
312. Gasbarri, Paolo, and Andrea Pisculli. "Dynamic/control interactions between flexible orbiting space-robot during grasping, docking and post-docking manoeuvres." *Acta Astronautica* 110 (2015): 225-238.
313. Mo, Kangtong, et al. "Precision Kinematic Path Optimization for High-DoF Robotic Manipulators Utilizing Advanced Natural Language Processing Models." 2024 5th International Conference on Electronic Communication and Artificial Intelligence (ICECAI). IEEE, 2024.
314. Hirzinger, Gerd, et al. "DLR's robotics technologies for on-orbit servicing." *Advanced Robotics* 18.2 (2004): 139-174.
315. Albrecht, Lynn J., J. Craig Baumgartner, and J. Gordon Marshall. "Evaluation of apical debris removal using various sizes and tapers of ProFile GT files." *Journal of endodontics* 30.6 (2004): 425-428.
316. Dyskin, Arcady V., et al. "The principle of topological interlocking in extraterrestrial construction." *Acta Astronautica* 57.1 (2005): 10-21.

317. Gao, Longsen, et al. "Autonomous multi-robot servicing for spacecraft operation extension." 2023 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). IEEE, 2023.
318. Huebner, Kai, Steffen Ruthotto, and Danica Kragic. "Minimum volume bounding box decomposition for shape approximation in robot grasping." 2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE, 2008.
319. Zhang, Ye, et al. "Self-adaptive robust motion planning for high dof robot manipulator using deep mpc." 2024 3rd International Conference on Robotics, Artificial Intelligence and Intelligent Control (RAIIC). IEEE, 2024.
320. Laliberté, Thierry, and Clément M. Gosselin. "Underactuation in space robotic hands." Proceeding of the Sixth International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space ISAIRAS: A New Space Odyssey. 2001.
321. Jiang, Anjie. "Building Load Analysis and Forecasting--A Case Study of the Building Load of the North Carolina State University Centennial Campus." (2014).
322. Oda, Mitsushige. "Space robot experiments on NASDA's ETS-VII satellite-preliminary overview of the experiment results." Proceedings 1999 IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No. 99CH36288C). Vol. 2. IEEE, 1999.
323. Liu, Rui, et al. "Enhanced detection classification via clustering svm for various robot collaboration task." arXiv preprint arXiv:2405.03026 (2024).
324. Ciocarlie, Matei, Corey Goldfeder, and Peter Allen. "Dexterous grasping via eigengrasps: A low-dimensional approach to a high-complexity problem." Robotics: Science and systems manipulation workshop-sensing and adapting to the real world. 2007.
325. Zhang, Ye, et al. "Development and application of a monte carlo tree search algorithm for simulating da vinci code game strategies." arXiv preprint arXiv:2403.10720 (2024).
326. Cianchetti, Matteo, et al. "Bioinspired locomotion and grasping in water: the soft eight-arm OCTOPUS robot." *Bioinspiration & biomimetics* 10.3 (2015): 035003.
327. Haberl, Jeff S., et al. Methodology to Develop the Airport Terminal Building Energy Use Intensity (ATB-EUI) Benchmarking Tool. No. ACRP 09-10. 2015.
328. Brost, Randy C. "Automatic grasp planning in the presence of uncertainty." *The International Journal of Robotics Research* 7.1 (1988): 3-17.
329. Zhang, Ye, et al. "Enhancing Text Authenticity: A Novel Hybrid Approach for AI-Generated Text Detection." arXiv preprint arXiv:2406.06558 (2024).
330. Marks, Mason. "Robots in space: Sharing the sidewalk with autonomous delivery vehicles." Available at SSRN 3347466 (2019).

331. Kondak, Konstantin, et al. "Closed-loop behavior of an autonomous helicopter equipped with a robotic arm for aerial manipulation tasks." *International Journal of Advanced Robotic Systems* 10.2 (2013): 145.
332. Gao, Longsen, Claus Danielson, and Rafael Fierro. "Adaptive robot detumbling of a non-rigid satellite." *arXiv preprint arXiv:2407.17617* (2024).
333. Hasan, Raza, et al. "An autonomous robot for intelligent security systems." 2018 9th IEEE Control and System Graduate Research Colloquium (ICSGRC). IEEE, 2018.
334. Gao, Longsen, et al. "Decentralized adaptive aerospace transportation of unknown loads using a team of robots." *arXiv preprint arXiv:2407.08084* (2024).
335. Dörfler, Kathrin, et al. "Mobile robotic brickwork: automation of a discrete robotic fabrication process using an autonomous mobile robot." *Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design 2016* (2016): 204-217.
336. Zhang, Ye, et al. "Deepgi: An automated approach for gastrointestinal tract segmentation in mri scans." *arXiv preprint arXiv:2401.15354* (2024).
337. Diftler, Myron A., et al. "Robonaut 2-the first humanoid robot in space." 2011 IEEE international conference on robotics and automation. IEEE, 2011.
338. Tan, Lianghao, et al. "Enhanced self-checkout system for retail based on improved YOLOv10." *Journal of Imaging* 10.10 (2024): 248.
339. Hochberg, Leigh R., et al. "Reach and grasp by people with tetraplegia using a neurally controlled robotic arm." *Nature* 485.7398 (2012): 372-375.
340. Zhu, Mengran, et al. "Ensemble methodology: Innovations in credit default prediction using lightgbm, xgboost, and localensemble." *arXiv preprint arXiv:2402.17979* (2024).
341. Kim, Hyun K., et al. "Continuous shared control for stabilizing reaching and grasping with brain-machine interfaces." *IEEE Transactions on Biomedical Engineering* 53.6 (2006): 1164-1173.
342. Jiang, Anjie. "A Simplified Dynamic Model of DFIG-based Wind Generation for Frequency Support Control Studies."
343. Birglen, Lionel, Thierry Laliberté, and Clément M. Gosselin. *Underactuated robotic hands*. Vol. 40. Springer, 2007.
344. Zhang, Yufeng, et al. "Manipulator control system based on machine vision." *International Conference on Applications and Techniques in Cyber Intelligence ATCI 2019: Applications and Techniques in Cyber Intelligence 7*. Springer International Publishing, 2020.
345. Mo, Kangtong, et al. "DRAL: Deep Reinforcement Adaptive Learning for Multi-UAVs Navigation in Unknown Indoor Environment." *arXiv preprint arXiv:2409.03930* (2024).



346. Kapadia, Apoorva, and Ian D. Walker. "Task-space control of extensible continuum manipulators." 2011 IEEE/RSJ international conference on intelligent robots and systems. IEEE, 2011.
347. Mo, Kangtong, et al. "Fine-Tuning Gemma-7B for Enhanced Sentiment Analysis of Financial News Headlines." arXiv preprint arXiv:2406.13626 (2024).
348. Gabiccini, Marco, et al. "On the role of hand synergies in the optimal choice of grasping forces." *Autonomous Robots* 31 (2011): 235-252.
349. Jiang, Anjie, et al. "Maximum Solar Energy Tracking Leverage High-DoF Robotics System with Deep Reinforcement Learning." arXiv preprint arXiv:2411.14568 (2024).
350. Bluethmann, William, et al. "Robonaut: A robot designed to work with humans in space." *Autonomous robots* 14 (2003): 179-197.
351. Ding, Tianqi, and Dawei Xiang. "Irregularity Inspection using Neural Radiance Field." arXiv preprint arXiv:2408.11251 (2024).
352. Hsiao, Kaijen, et al. "Reactive grasping using optical proximity sensors." 2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE, 2009.
353. Jiang, Tongzhou, et al. "Trajectory Tracking Using Frenet Coordinates with Deep Deterministic Policy Gradient." arXiv preprint arXiv:2411.13885 (2024).
354. Yin, Jianjian, et al. "Class Probability Space Regularization for semi-supervised semantic segmentation." *Computer Vision and Image Understanding* 249 (2024): 104146.
355. Abiko, Satoko, and Kazuya Yoshida. "Adaptive reaction control for space robotic applications with dynamic model uncertainty." *Advanced Robotics* 24.8-9 (2010): 1099-1126.
356. Yin, Jianjian, et al. "Semi-supervised semantic segmentation with multi-reliability and multi-level feature augmentation." *Expert Systems with Applications* 233 (2023): 120973.
357. Slotine, Jean-Jacques E., and Weiping Li. "Composite adaptive control of robot manipulators." *Automatica* 25.4 (1989): 509-519.
358. Ding, Tianqi, and Dawei Xiang. "Irregularity Inspection using Neural Radiance Field." arXiv preprint arXiv:2408.11251 (2024).
359. Boulkroune, Abdesslem, et al. "Fuzzy adaptive controller for MIMO nonlinear systems with known and unknown control direction." *Fuzzy sets and systems* 161.6 (2010): 797-820.
360. Jiang, Tongzhou, et al. "Trajectory tracking using frenet coordinates with deep deterministic policy gradient." arXiv preprint arXiv:2411.13885 (2024).

361. Albert Atserias, Anuj Dawar, and Joanna Fijalkow. 2021. On the Power of Symmetric Linear Programs. *J. ACM* 68, 4 (2021), 26:1–26:35.
362. Saugata Basu, Richard Pollack, and Marie-Francoise Roy. 2006. *Algorithms in Real Algebraic Geometry*. Springer-Verlag.
363. Thomas Colcombet. 2015. Unambiguity in Automata Theory. In *Proc. DCFS 2015 (LNCS, Vol. 9118)*. Springer, 3–18.
364. Arms, William Y. (2000): *Digital libraries*, Cambridge, Massachusetts, MIT Press.
365. Волонтир Л. О. Чисельні методи: Навч. посіб. - / Л. О. Волонтир, Л .В. Зелінська, Н. А. Потапова, І. А. Чіков - Вінницький національний аграрний університет. – Вінниця: ВНАУ, 2020 – 322 с.
366. Pierson, Harry A., and Michael S. Gashler. "Deep learning in robotics: a review of recent research." *Advanced Robotics* 31.16 (2017): 821-835.
367. Sünderhauf, Niko, et al. "The limits and potentials of deep learning for robotics." *The International journal of robotics research* 37.4-5 (2018): 405-420.
368. Luo, Sha, et al. "Robot detection and localization based on deep learning." *2017 Chinese Automation Congress (CAC)*. IEEE, 2017.
369. Gao, Longsen, et al. "Autonomous multi-robot servicing for spacecraft operation extension." *2023 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. IEEE, 2023.
370. Wang, Ziheng, and Ann Majewicz Fey. "Deep learning with convolutional neural network for objective skill evaluation in robot-assisted surgery." *International journal of computer assisted radiology and surgery* 13 (2018): 1959-1970.
371. Lenz, Ian, Honglak Lee, and Ashutosh Saxena. "Deep learning for detecting robotic grasps." *The International Journal of Robotics Research* 34.4-5 (2015): 705-724.
372. Wang, Jingyi, et al. "Robot: Robustness-oriented testing for deep learning systems." *2021 IEEE/ACM 43rd International Conference on Software Engineering (ICSE)*. IEEE, 2021.
373. Yu, Liqiang, et al. "Stochastic analysis of touch-tone frequency recognition in two-way radio systems for dialed telephone number identification." *2024 7th International Conference on Advanced Algorithms and Control Engineering (ICAACE)*. IEEE, 2024.
374. Shvets, Alexey A., et al. "Automatic instrument segmentation in robot-assisted surgery using deep learning." *2018 17th IEEE international conference on machine learning and applications (ICMLA)*. IEEE, 2018.
375. Gao, Longsen, Claus Danielson, and Rafael Fierro. "Adaptive Robot Detumbling of a Non-Rigid Satellite." *arXiv preprint arXiv:2407.17617* (2024).

376. Levine, Sergey, et al. "Learning hand-eye coordination for robotic grasping with deep learning and large-scale data collection." *The International journal of robotics research* 37.4-5 (2018): 421-436.
377. Choi, Sung Ho, et al. "An integrated mixed reality system for safety-aware human-robot collaboration using deep learning and digital twin generation." *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 73 (2022): 102258.
378. Zhang, Yufeng, et al. "Manipulator control system based on machine vision." *International Conference on Applications and Techniques in Cyber Intelligence ATCI 2019: Applications and Techniques in Cyber Intelligence 7*. Springer International Publishing, 2020.
379. Zhang, Lin, Yingjie Zhang, and Yangfan Li. "Path planning for indoor mobile robot based on deep learning." *Optik* 219 (2020): 165096.
380. Eitel, Andreas, et al. "Multimodal deep learning for robust RGB-D object recognition." *2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. IEEE, 2015.
381. LeCun, Yann, Yoshua Bengio, and Geoffrey Hinton. "Deep learning." *nature* 521.7553 (2015): 436-444.
382. Gao, Longsen, et al. "Decentralized Adaptive Aerospace Transportation of Unknown Loads Using A Team of Robots." *arXiv preprint arXiv:2407.08084* (2024).
383. Längkvist, Martin, Lars Karlsson, and Amy Loutfi. "A review of unsupervised feature learning and deep learning for time-series modeling." *Pattern recognition letters* 42 (2014): 11-24.
384. Ke, Xinda, Anjie Jiang, and Ning Lu. "Load profile analysis and short-term building load forecast for a university campus." *2016 IEEE Power and Energy Society General Meeting (PESGM)*. IEEE, 2016. Sünderhauf, Niko, et al. "The limits and potentials of deep learning for robotics." *The International journal of robotics research* 37.4-5 (2018): 405-420.
385. Oda, Mitsushige. "Space robot experiments on NASDA's ETS-VII satellite-preliminary overview of the experiment results." *Proceedings 1999 IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No. 99CH36288C)*. Vol. 2. IEEE, 1999.
386. Mo, Kangtong, et al. "Precision Kinematic Path Optimization for High-DoF Robotic Manipulators Utilizing Advanced Natural Language Processing Models." *2024 5th International Conference on Electronic Communication and Artificial Intelligence (ICECAI)*. IEEE, 2024.
387. Oda, Mitsushige, Kouichi Kibe, and Fumio Yamagata. "ETS-VII, space robot in-orbit experiment satellite." *Proceedings of IEEE international conference on robotics and automation*. Vol. 1. IEEE, 1996.

388. Zhang, Ye, et al. "Self-adaptive robust motion planning for high dof robot manipulator using deep mpc." 2024 3rd International Conference on Robotics, Artificial Intelligence and Intelligent Control (RAIIC). IEEE, 2024.
389. Xu, Yangsheng, et al. "Adaptive control of space robot system with an attitude controlled base." *Space robotics: Dynamics and control* (1993): 229-268.
390. Yoshida, Kazuya. "Experimental study on the dynamics and control of a space robot with experimental free-floating robot satellite." *Advanced Robotics* 9.6 (1994): 583-602.
391. Gao, Longsen, et al. "Autonomous multi-robot servicing for spacecraft operation extension." 2023 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). IEEE, 2023.
392. Jiang, Anjie. "Building Load Analysis and Forecasting--A Case Study of the Building Load of the North Carolina State University Centennial Campus." (2014).
393. Yoshida, Kazuya. "Space robot dynamics and control: to orbit, from orbit, and future." *Robotics Research: The Ninth International Symposium*. Springer London, 2000.
394. Zhang, Ye, et al. "Development and application of a monte carlo tree search algorithm for simulating da vinci code game strategies." arXiv preprint arXiv:2403.10720 (2024).
395. Ueno, Hiroshi, et al. "Space robotic mission concepts for capturing stray objects." *The Journal of Space Technology and Science* 18.2 (2002): 2\_1-2\_8.
396. Haberl, Jeff S., et al. *Methodology to Develop the Airport Terminal Building Energy Use Intensity (ATB-EUI) Benchmarking Tool*. No. ACRP 09-10. 2015.
397. Zhang, Ye, et al. "Enhancing Text Authenticity: A Novel Hybrid Approach for AI-Generated Text Detection." arXiv preprint arXiv:2406.06558 (2024).
398. Jiang, Anjie, et al. "Maximum Solar Energy Tracking Leverage High-DoF Robotics System with Deep Reinforcement Learning." (2024).
399. Zhang, Ye, et al. "Deepgi: An automated approach for gastrointestinal tract segmentation in mri scans." arXiv preprint arXiv:2401.15354 (2024).
400. Johnson, Nicholas L. "Orbital debris: the growing threat to space operations." 33rd Annual Guidance and Control Conference. No. AAS 10-011. 2010.
401. Gao, Longsen, Claus Danielson, and Rafael Fierro. "Adaptive Robot Detumbling of a Non-Rigid Satellite." arXiv preprint arXiv:2407.17617 (2024).
402. Thrun, Sebastian, and Tom M. Mitchell. "Lifelong robot learning." *Robotics and autonomous systems* 15.1-2 (1995): 25-46.
403. Tan, Lianghao, et al. "Enhanced self-checkout system for retail based on improved YOLOv10." *Journal of Imaging* 10.10 (2024): 248.

404. Zhu, Mengran, et al. "Ensemble methodology: Innovations in credit default prediction using lightgbm, xgboost, and localensemble." arXiv preprint arXiv:2402.17979 (2024).
405. Singh, Satinder Pal. "Transfer of learning by composing solutions of elemental sequential tasks." *Machine learning* 8 (1992): 323-339.
406. Jiang, Anjie. "A Simplified Dynamic Model of DFIG-based Wind Generation for Frequency Support Control Studies."
407. Smola, Alex, and S. V. N. Vishwanathan. "Introduction to machine learning." Cambridge University, UK 32.34 (2008): 2008.
408. Mo, Kangtong, et al. "DRAL: Deep Reinforcement Adaptive Learning for Multi-UAVs Navigation in Unknown Indoor Environment." arXiv preprint arXiv:2409.03930 (2024).
409. Kuipers, Benjamin, and Yung-Tai Byun. "A robot exploration and mapping strategy based on a semantic hierarchy of spatial representations." *Robotics and autonomous systems* 8.1-2 (1991): 47-63.
410. Adhikari, R., et al. "Fluctuating lattice boltzmann." *Europhysics Letters* 71.3 (2005): 473.
411. Thrun, Sebastian, et al. "Stanley: The robot that won the darpa grand challenge." *The 2005 DARPA grand challenge: the great robot race* (2007): 1-43.
412. Arkin, Ronald C., and Robin R. Murphy. "Autonomous navigation in a manufacturing environment." *IEEE transactions on robotics and automation* 6.4 (1990): 445-454. Lipson, Hod, and Jordan B. Pollack. "Automatic design and manufacture of robotic lifeforms." *Nature* 406.6799 (2000): 974-978.
413. Gao, Longsen, et al. "Decentralized Adaptive Aerospace Transportation of Unknown Loads Using A Team of Robots." arXiv preprint arXiv:2407.08084 (2024).
414. Webster III, Robert J., and Bryan A. Jones. "Design and kinematic modeling of constant curvature continuum robots: A review." *The International Journal of Robotics Research* 29.13 (2010): 1661-1683.
415. Bhaskaran, Shyam, et al. "Orbit determination performance evaluation of the deep space 1 autonomous navigation system." (1998).
416. Hornyk, Timothy N. *Loving the machine: The art and science of Japanese robots*. Kodansha International, 2006.
417. Mo, Kangtong, et al. "Fine-Tuning Gemma-7B for Enhanced Sentiment Analysis of Financial News Headlines." arXiv preprint arXiv:2406.13626 (2024).
418. Liu, Rui, et al. "Enhanced detection classification via clustering svm for various robot collaboration task." arXiv preprint arXiv:2405.03026 (2024).

419. Романюк О. Н., Романюк О. В., Чехместрук Р. Ю. Комп'ютерна графіка. Вінниця : ВНТУ, 2023. 147 с.
420. The Concept and Means of Adaptive Shading / O. Romanyuk et al. 2022 12th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT), Ruzomberok, Slovakia, 26–28 September 2022. 2022. URL: <https://doi.org/10.1109/acit54803.2022.9913105> (date of access: 02.10.2024).
421. Романюк О. Н. Класифікація дистрибутивних функцій відбивної здатності поверхні. Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія «Інформатика, кібернетика і обчислювальна техніка». 2008. № 9. С. 145–151.
422. McReynolds T., Blythe D. Advanced Graphics Programming Using OpenGL. Elsevier Science & Technology Books, 2005. 672 p.
423. Guy R., Agopian M. Physically Based Rendering in Filament. <https://google.github.io/filament/Filament.md.html>. URL: <https://google.github.io/filament/Filament.md.html#citation-estevez17> (date of access: 24.09.2024).
424. FREE materials | BlenderKit. BlenderKit. URL: [https://www.blenderkit.com/asset-gallery?query=order:-created+is\\_free:true+category:material](https://www.blenderkit.com/asset-gallery?query=order:-created+is_free:true+category:material) (date of access: 24.09.2024).
425. New Surface Reflectance Model With The Combination Of Two Cubic Functions Usage / O. Romanyuk et al. Informatyka, Automatyka, Pomiarы w Gospodarce i Ochronie Środowiska. 2023. Vol. 13, no. 3. P. 101–106. URL: <https://doi.org/10.35784/iapgos.5327> (date of access: 24.09.2024).
426. Optical system visualization of combined reflectance model based on cubic and quadratic functions / O. Romanyuk et al. Optical Fibers and Their Applications 2023, Lublin, Poland, 11–14 September 2023 / ed. by Z. Omiotek, A. Smolarz, W. Wójcik. 2023. URL: <https://doi.org/10.1117/12.3023138> (date of access: 24.09.2024).
427. The Development of Physically Correct Reflectance Model Based on Logarithm Function / O. Romanyuk et al. 2023 13th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT), Wrocław, Poland, 21–23 September 2023. 2023. URL: <https://doi.org/10.1109/acit58437.2023.10275589> (date of access: 24.09.2024).
428. Романюк О. Н., Завальнюк Є. К., Бобко О. Л. Аналіз нових моделей освітлення на основі двопробеневих функцій відбивної здатності. Україна та світ: сучасні парадигми розвитку суспільства. Харків, 2024. С. 16–39.
429. Effective models for the specular color constituent computing / A. N. Romanyuk et al. Journal of Computer Science and Engineering. 2010. Vol. 2, issue 2. P. 25 – 29.

430. Romanyuk A., Hast A., Lyashenko Y. Efficient Methods for Fast Shading. *Advances in Electrical and Computer Engineering*. 2008. Vol. 8, no. 2. P. 82–85. URL: <https://doi.org/10.4316/aece.2008.02015> (date of access: 06.10.2024).
431. Microfacet distribution function for physically based bidirectional reflectance distribution functions / O. N. Romanyuk et al. *Optical Fibers and Their Applications 2012*, Krasnobrod, Poland. 2013. URL: <https://doi.org/10.1117/12.2019338> (date of access: 06.10.2024).
432. Modification of existing methods of visualization of offset face skin structure / S. O. Romanyuk et al. *Optical Fibers and Their Applications 2020*, Bialowieza, Poland, 27–31 January 2020 / ed. by R. S. Romaniuk, J. Dorosz. 2020. URL: <https://doi.org/10.1117/12.2569770> (date of access: 06.10.2024).
433. Akenine-Möller T. *Real-Time Rendering*. Fourth edition. | Boca Raton : Taylor & Francis, CRC Press, 2018. : AK Peters/CRC Press, 2018. URL: <https://doi.org/10.1201/b22086> (date of access: 24.09.2024).
434. Шишацький А. В., Башкиров О. М., Костина О. М. Розвиток інтегрованих систем зв'язку та передачі даних для потреб Збройних Сил. // Науково-технічний журнал “Озброєння та військова техніка”. 2015. № 1(5). С. 35 –40.
435. V. Dudnyk, Yu. Sinenko, M. Matsyk, Ye. Demchenko, R. Zhyvotovskiyi, Iu. Repilo, O. Zabolotnyi, A. Simonenko, P. Pozdniakov, A. Shyshatskiy. Development of a method for training artificial neural networks for intelligent decision support systems. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. Vol. 3. No. 2 (105). 2020. pp. 37–47. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.203301>.
436. Sova, O., Shyshatskiy, A., Salnikova, O., Zhuk, O., Trotsko, O., & Hrokholskiy, Y. Development of a method for assessment and forecasting of the radio electronic environment. *EUREKA: Physics and Engineering*, 2021, No. 4, pp. 30-40. <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2021.001940>.
437. Pievtsov, H., Turinskiy, O., Zhyvotovskiy, R., Sova, O., Zvieriev, O., Lanetskii, B., and Shyshatskiy, A. (2020). Development of an advanced method of finding solutions for neuro-fuzzy expert systems of analysis of the radioelectronic situation. *EUREKA: Physics and Engineering*, No. (4), pp. 78-89. <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2020.001353>.
438. P. Zuiev, R. Zhyvotovskiy, O. Zvieriev, S. Hatsenko, V. Kuprii, O. Nakonechniy, M. Adamenko, A. Shyshatskiy, Y. Neroznak, V. Velychko. Development of complex methodology of processing heterogeneous data in intelligent decision support systems. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020, Vol. 4, No. 9 (106), pp. 14–23. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.208554>.

439. A. Shyshatskyi, O. Zvieriev, O. Salnikova, Ye. Demchenko, O. Trotsko, Ye. Neroznak. Complex Methods of Processing Different Data in Intellectual Systems for Decision Support System. *International Journal of Advanced Trends in Computer Science and Engineering*. Vol. 9, No. 4, pp. 5583–5590 DOI: <https://doi.org/10.30534/ijatcse/2020/206942020>.
440. Nechyporuk, O., Sova, O., Shyshatskyi, A., Kravchenko, S., Nalapko, O., Shknai, O., Klimovych, S., Kravchenko, O., Kovbasiuk, O., Bychkov, A. (2023). Development of a method of complex analysis and multidimensional forecasting of the state of intelligence objects. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, Vol. 2, No. 4 (122), pp. 31–41. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.276168>.
441. Koval, V., Nechyporuk, O., Shyshatskyi, A., Nalapko, O., Shknai, O., Zhyvylo, Y., Yerko, V., Kremynskyi, B., Kovbasiuk, O., Bychkov, A. (2023). Improvement of the optimization method based on the cat pack algorithm. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, Vol. 1, No.9 (121), pp. 41–48. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.273786>.
442. Шишацький А. В., Зайцев М. М., Гаценко С. С. Аналіз характеру сучасних воєнних конфліктів Україна в умовах сучасних викликів та загроз: глобальний та національний виміри: матеріали наук.-практ. семінару (Київ, 17 лют. 2023 р.) / за ред. Г. П. Ситника, Л. М. Шипілової. Київ: На-вч.-наук. ін-т публ. упр. та держ. служби Київ. нац.ун-ту імені Тараса Шевченка, 2023. С.46–49.
443. Заграновская А. В., Эйсснер Ю. Н. Моделирование сценариев развития экономической ситуации на основе нечетких когнитивных карт. *Современная экономика: проблемы и решения*. 2017, №10 (94), С. 33–47. DOI: [10.17308/meps.2017.10/1754](https://doi.org/10.17308/meps.2017.10/1754).
444. Симанков В. С., Путятю М. М. Исследование методов когнитивного анализа. Системный анализ, управление и обработка информации. 2013, № 13. С. 31–35.
445. Y.-C. Ko, H. Fujita. An evidential analytics for buried information in big data samples: Case study of semiconductor manufacturing. *Information Sciences*. 2019. Vol. 486. pp. 190–203. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ins.2019.01.079>.
446. I. J.Ramaji, A. M. Memari. Interpretation of structural analytical models from the coordination view in building information models. *Automation in Construction*. 2018. Vol. 90. pp. 117–133. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.02.025>.
447. C. J.Pérez-González, M. Colebrook, J. L. Roda-García, C. B. Rosa-Remedios. Developing a data analytics platform to support decision making in emergency and security management. *Expert Systems with Applications*. 2019. Vol. 120. pp. 167–184. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2018.11.023>.
448. H. Chen. Evaluation of Personalized Service Level for Library Information Management Based on Fuzzy Analytic Hierarchy Process. *Procedia Computer Science*. Vol. 131. 2018. pp. 952–958. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2018.04.233>.



449. H. K. Chan, X. Sun, S.-H. Chung. When should fuzzy analytic hierarchy process be used instead of analytic hierarchy process? *Decision Support Systems*. 2019. pp. 1–37. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dss.2019.113114>.
450. A. M. S. Osman. A novel big data analytics framework for smart cities. *Future Generation Computer Systems*. 2019. Vol. 91. pp. 620–633. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.future.2018.06.046>.
451. I. Gödri, C. Kardos, A. Pfeiffer, J. Váncza. Data analytics-based decision support workflow for high-mix low-volume production systems. *CIRP Annals*. Vol. 68. Issu. 1. 2019. pp. 471–474. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2019.04.001>.
452. J. L. Harding. Data quality in the integration and analysis of data from multiple sources: some research challenges. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Vol. XL-2/W1. 2013. pp. 59–63. DOI: [10.5194/isprsarchives-XL-2-W1-59-2013](https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-2-W1-59-2013).
453. Kosko B. Fuzzy cognitive maps. *Intern. Journal of Man-Machine Studies*. 1986., Vol. 1., pp. 65–75.
454. Горелова Г.В. Когнитивный подход к имитационному моделированию сложных систем. *Известия ЮФУ. Технические науки*. 2013. № 3. С. 239–250.
455. Orouskhani, M., Orouskhani, Y., Mansouri, M., Teshnehlav, M. A novel cat swarm optimization algorithm for unconstrained optimization problems, *International Journal “Information Technology and Computer Science”*, 2013, Vol. 11, pp. 32 – 41.
456. A. Koshlan, O. Salnikova, M. Chekhovska, R. Zhyvotovskiy, Y. Prokopenko, T. Hurskyi, A. Yefymenko, Y. Kalashnikov, S. Petruk, A. Shyshatskyi. Development of an algorithm for complex processing of geospatial data in the special-purpose geoinformation system in conditions of diversity and uncertainty of data. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. Vol. 5. No. 9 (101). 2019. pp. 16–27. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.180197>.
457. Mahdi Q. A., Shyshatskyi A., Prokopenko Y., Ivakhnenko T., Kupriyenko D., Golian V., Lazuta R., Kravchenko S., Protas N. & Momit A. Development of estimation and forecasting method in intelligent decision support systems. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2021, Vol. 3, No. 9(111), pp. 51–62. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.232718>.
458. Емельянов В. В., Курейчик В. В., Курейчик В. М., Емельянов В. В. Теория и практика эволюционного моделирования. М.: Физматлит, 2003. –432 с.
459. Гороховатський В., Стяглик Н., Царевська, В. Комбінаційний метод прискороного метричного пошуку даних у задачах класифікації зображень. *Сучасні інформаційні системи*. 2021. Том 5, № 3, с. 5–12. <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2021.3.01>.

460. Levashenko, V., Liashenko, O., Kuchuk, N. Побудова системи підтримки прийняття рішень на основі нечітких даних. Сучасні інформаційні системи, 2020, Том 4, № 4, с. 48–56. <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2020.4.07>.
461. Meleshko, Y., Drieiev, O., Drieieva, H. Метод ідентифікації профілів ботів на основі нейронних мереж у рекомендаційних системах. Сучасні інформаційні системи, Том 4, № 2, с. 24–28. <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2020.2.05>.
462. Kuchuk, N., Merlak, V., & Skorodelov, V. Метод зменшення часу доступу до слабкоструктурованих даних. Сучасні інформаційні системи. 2020. Том 4, № 1, с. 97–102. <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2020.1.14>.
463. Shyshatskyi, A., Tiurnikov, M., Suhak, S., Bondar, O., Melnyk, A., Vokhno, T., & Lyashenko, A. Методика оцінки ефективності системи зв'язку оперативного угруповання військ. Сучасні інформаційні системи. 2020. Том 4, № 1, с. 107–112. <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2020.1.16>.
464. Raskin, L., & Sira, O. (2016). Method of solving fuzzy problems of mathematical programming. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5(4 (83)), 23–28. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.81292>
465. Lytvyn, V., Vysotska, V., Pukach, P., Brodyak, O., & Ugryn, D. Development of a method for determining the keywords in the slavic language texts based on the technology of web mining. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2017, Vol. 2, No. 2 (86), pp. 14–23. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.98750>
466. Stepanenko, A., Oliinyk, A., Deineha, L., & Zaiko, T. (2018). Development of the method for decomposition of superpositions of unknown pulsed signals using the second-order adaptive spectral analysis. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2018, Vol. 2, No.9 (92), pp. 48–54. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.126578>.
467. Nechyporuk, O., Sova, O., Shyshatskyi, A., Kravchenko, S., Nalapko, O., Shknai, O., Klimovych, S., Kravchenko, O., Kovbasiuk, O., & Bychkov, A. (2023). Development of a method of complex analysis and multidimensional forecasting of the state of intelligence objects . *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, Vol 2, No. 4 (122), pp. 31–41. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.276168>.
468. Tarkhan, A. B., Zhuravskyi, Y., Shyshatskyi, A., Pluhina, T., Dudnyk, V., Kiris, I., Nalapko, O., Protas, N., Neronov, S., & Nechyporuk, V. (2023). Development of a solution search method using an improved fish school algorithm . *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, Vol. 4, No. 4 (124), pp. 27–33. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.284315>.
469. Koval, V., Shyshatskyi, A., Ransevych, R., Gura, V., Nalapko, O., Shypilova, L., Protas, N., Volkov, O., Stanovskyi, O., & Chaikovska, O. (2023). Development of a method for the search of solutions in the sphere of national security using bio-inspired algorithms. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, Vol. 3, No. 4 (123), pp. 6–13. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.280355>

470. Koval M., Sova O., Shyshatskyi A., Orlov O., Artabaiev Yu., Shknai O., Veretnov A., Koshlan O., Zhyvylo Ye., Zhyvylo I. Improvement of complex resource management of special-purpose communication systems. *Eastern-european journal of enterprise technologies*, 2022, Vol 5, No 9 (119), pp.34–44. DOI: 10.15587/1729-4061.2022.266009.
471. Налапко О. Л. Analysis of technical characteristics of the network with possibility to self-organization / О. Л. Налапко, А. В. Шишацький. // *Сучасні інформаційні системи*. – Харків, 2018. – №4, Том 2. – С. 78–86.
472. Nina Kuchuk, Amin Salih Mohammed, Andrii Shyshatskyi and Oleksii Nalapko. The Method of Improving the Efficiency of Routes Selection in Networks of Connection with the Possibility of Self-Organization (Scopus). *International Journal of Advanced Trends in Computer Science and Engineering*. – 2019. – №1.2., Volume 8. – С. 1–6. DOI: 10.30534/ijatcse/2019/0181.22019.
473. Analysis of mathematical apparatus for managing channel and network resources of military radio communication systems / O.Nalapko, R. Pikul, P. Zhuk, A. Shyshatskyi. // *Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка, Наукове періодичне видання “Системи управління, навігації та зв'язку”*, Збірник наукових праць. – Полтава, 2019. – №3(55). – С. 166–170.
474. O. Nalapko, A. Shyshatskyi, V. Ostapchuk, Qasim Abbood Mahdi, R. Zhyvotovskiy, S. Petruk, Ye. Lebel, S. Diachenko, V. Velychko, I. Poliak Development of a method of adaptive control of military radio network parameters. // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. Volume 9 – 2021. – № 1(109). – С. 18–32. DOI: 10.15587/1729-4061.2021.225331.
475. I. Alieinykov, K. A. Thamer, Y. Zhuravskiy, O. Sova, N. Smirnova, R. Zhyvotovskiy, S.Hatsenko, S. Petruk, R. Pikul, A. Shyshatskyi. Development of a method of fuzzy evaluation of information and analytical support of strategic management. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. Vol. 6. No. 2 (102). 2019. pp. 16–27. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.184394>.
476. Shyshatskyi A. Method of multicriterial evaluation of the state of the special purposes of radio communication system channels / A. Shyshatskyi, O. Zhuk, R. Zhyvotovskiy, P. Zhuk // *Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України*. - 2017. - № 4. - С. 75-83. - Режим доступу: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nitps\\_2017\\_4\\_12](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nitps_2017_4_12).
477. Shyshatskyi, A., Sova, O., Zhuravskiy, Y., Zhyvotovskiy, R., Lyashenko, A., Cherniak, O., Zinchenko, K., Lazuta, R., Melnyk, A., & Simonenko, A. (2019). Development of resource distribution model of automated control system of special purpose in conditions of insufficiency of information on operational development. *Technology Audit and Production Reserves*,. Vol. 1, No 2(51), pp. 35–39. <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2020.198082>.

478. Nalapko, O., Sova, O., Shyshatskyi, A., Protas, N., Kravchenko, S., Solomakha, A., Neroznak, Y., Gaman, O., Merkotan, D., & Miahkykh, H. (2021). Analysis of methods for increasing the efficiency of dynamic routing protocols in telecommunication networks with the possibility of self-organization. *Technology Audit and Production Reserves*, Vol. 5, No. 2(61), pp. 44–48. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2021.239096>.
479. Minochkin, A., Shyshatskyi, A., Hasan, V., Hasan, A., Opolak, A., Hlushko, A., Demchenko, O., Lyashenko, A., Havryliuk, O., & Ostapenko, S. (2021). The improvement of method for the multi-criteria evaluation of the effectiveness of the control of the structure and parameters of interference protection of special-purpose radio communication systems. *Technology Audit and Production Reserves*, Vol. 4, No.2(60), pp. 22–27. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2021.235465>.
480. Oleg Sova, Hryhorii Radzivilov, Andrii Shyshatskyi, Dmytro Shevchenko, Bohdan Molodetskyi, Vitalii Stryhun, Yurii Yivzhenko, Yevhen Stepanenko, Nadiia Protas, & Oleksii Nalapko. (2022). Development of the method of increasing the efficiency of information transfer in the special purpose networks. *Eastern-european Journal of Enterprise Technologies*, 3(4 (117)), 6–14. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.259727> .
481. Sova, O., Zhuravskyi, Y., Vakulenko, Y., Shyshatskyi, A., Salnikova, O., & Nalapko, O. (2022). Development of methodological principles of routing in networks of special communication in conditions of fire storm and radio-electronic suppression. *EUREKA: Physics and Engineering*, (3), 159-166. <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2022.002434>.
482. Oleg Sova, Hryhorii Radzivilov, Andrii Shyshatskyi, Pavel Shvets, Valentyna Tkachenko, Serhii Nevhad, Oleksandr Zhuk, Serhii Kravchenko, Bohdan Molodetskyi, & Hennadii Miahkykh. (2022). Development of a method to improve the reliability of assessing the condition of the monitoring object in special-purpose information systems. *Eastern-european Journal of Enterprise Technologies*, 2(3 (116)), 6–14. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.254122>.
483. Шишацький А.В., Сова О.Я., Журавський Ю.В., Троцько О.О. Методологічні засади інтелектуальної обробки даних в інтелектуальних системах підтримки прийняття рішень. *Theoretical and scientific foundations in research in Engineering: collective monograph / Beresjuk O., Lemeschew M., Stadnijtschuk M., – etc. – International Science Group. – Boston : Primedia eLaunch, 2022. 543 p. Available at :DOI – 10.46299/ISG.2022.MONO.TECH.1. URL: <https://isg-konf.com/theoretical-and-scientific-foundations-in-research-in-engineering/>*
484. Романов О. М., Шишацький А. В., Налапко О. Л. Розробка методу підвищення оперативності передачі інформації в мережах спеціального призначення. *Modernn aspekty vědy: XXI. Dñl mezinbrodnn kolektivnn monografie / Mezinbrodnn Ekonomickэ Institut s.r.o.. Āeskб republika: Mezinbrodnn Ekonomickэ Institut s.r.o., 2022. С. 381-403.*

485. Шишацький А.В., Одарущенко О.Б., Кашкевич С.О., Пилипчук І.Ю., Мягих Г.Г. Обґрунтування методів інтелектуального аналізу даних для вирішення задачі прийняття рішень в умовах невизначеності впливу обстановки. Theoretical and practical scientific achievements: research and results of their implementation: collection of scientific papers «SCIENTIA» with Proceedings of the IV International Scientific and Theoretical Conference, April 7, 2023. Pisa, Italian Republic: European Scientific Platform. pp. 93-87. ISBN 979-8-88955-784-5, DOI 10.36074/scientia-07.04.2023.
486. Sova, O., Zhuravskiy, Y., Zaitsev, M., Shyshatskiy, A., Andriishena, H. (2022). Development of an approach to the creation of an intellectual system of national security management. ScienceRise, No. 6, pp. 18–24. doi: <http://doi.org/10.21303/2313-8416.2022.002811>.
487. Shyshatskiy, A., Hurskiy, T., Vdovytskyi, Y., Vozniak, R., Nalapko, O., Andriishena, H., Shabanova-Kushnarenko, L., Protas, N., Vakulenko, Y., & Pyvovarchuk, S. (2023). Development of method for the identification of hybrid challenges and threats in the national security management system. Technology Audit and Production Reserves, No. 2(70), pp. 16–19. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2023.276544>.
488. Mohammed, B. A., Zhuk, O., Vozniak, R., Borysov, I., Petrozhalko, V., Davydov, I., Borysov, O., Yefymenko, O., Protas, N., & Kashkevich, S. Improvement of the solution search method based on the cuckoo algorithm . Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2023, Vol. 2, No. 4 (122), pp. 23–30. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.277608>.
489. Mamoori, G. A., Sova, O., Zhuk, O., Repilo, I., Melnyk, B., Sus, S., Bondarchuk, M., Kashkevich, S., Moroz, M., & Klyuchak, O. The development of solution search method using improved jumping frog algorithm. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2023, Vol. 4, No. 3 (124), pp. 45–53. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.285292>.
490. Shyshatskiy, A., Romanov, O., Shknai, O., Babenko, V., Koshlan, O., Pluhina, T., Biletska, A., Stasiuk, T., & Kashkevich, S. Development of a solution search method using the improved emperor penguin algorithm. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2023, Vol. 6, No. 4 (126), pp. 6–13. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.291008>.
491. Tamer, K. A., Sova, O., Shaposhnikova, O., Yashchenok, V., Stanovska, I., Shostak, S., Rudenko, O., Petruk, S., Matsyi, O., & Kashkevich, S. Development of a solution search method using a combined bio-inspired algorithm. EasternEuropean Journal of Enterprise Technologies. 2024, Vol. 1, No. 4 (127), pp. 6–13. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.298205>.

492. Шишацький А. В., Жук О. В., Неронов С.М., Протас Н. М., Кашкевич С. О. “Сукупність методик підвищення оперативності прийняття рішень з використанням метаевристичних алгоритмів”. Монографія. C91 Moderní aspekty vědy: XL. Díl mezinárodní kolektivní monografie / Mezinárodní Ekonomický Institut s.r.o. Česká republika: Mezinárodní Ekonomický Institut s.r.o., 2024. pp. 529 – 557. URL: <http://perspectives.pp.ua/public/site/mono/mono-40.pdf>.
493. Шишацький А. В., Маций О. Б., Яценко В. Ж., Троцько О. О. Кашкевич С. О. “Сукупність методик підвищення оперативності прийняття рішень з використанням комбінованих метаевристичних алгоритмів”. Монографія. C91 Moderní aspekty vědy: XL. Díl mezinárodní kolektivní monografie / Mezinárodní Ekonomický Institut s.r.o.. Česká republika: Mezinárodní Ekonomický Institut s.r.o., 2024. pp. 558 – 594. URL: <http://perspectives.pp.ua/public/site/mono/mono-40.pdf>.
494. Шишацький А. В., Кашкевич С. О. “Аналіз форм та способів застосування безпілотних літальних апаратів”. XXII Міжнародна науково-практична конференція “Modern theories and improvement of world methods”, 06 – 09 червня 2023, Гельсінкі, Фінляндія. С. 516 – 520. URL: <https://isg-konf.com/uk/modern-theories-and-improvement-of-world-methods/>.
495. Кузьменко О. М., Стасюк Т. О., Кашкевич С. О. “Використання безпілотних літальних апаратів в сучасних телекомунікаційних мережах”. XVI Міжнародна науково-практична конференція “Methods of solving complex problems in science”, 25 – 28 квітня 2023, Прага, Чехія. С. 525 – 530. URL: <https://isg-konf.com/uk/methods-of-solving-complex-problems-in-science/>.
496. Апенько Н. В., Кашкевич С. О. “Побудова уніфікованих моделей представлення знань в експертних системах управління”. Міжнародна науково-практична конференція “Теоретико-практичні аспекти розвитку науки, освіти та суспільства”, 28 квітня 2023, Україна, Рівне. С. 72 – 73. URL: <https://www.economics.in.ua/2023/04/28-2023.html>.
497. Нечипорук О. П., Кашкевич С. О., Голего Н. М. “Метод децентралізованого управління мережевими ресурсами інформаційно-комунікаційних мереж”. XIX Міжнародна науково-практична конференція “Innovative approaches to solving scientific problems”, 16 – 19 травня 2023, Токіо, Японія. С. 454 – 458. URL: <https://isg-konf.com/uk/innovative-approaches-to-solving-scientific-problems/>.
498. Нечипорук О. П., Кашкевич С. О., Юдіна Л. Г. “Аналіз технічних характеристик гібридних безпроводних мереж”. XXIV Міжнародна науково-практична конференція “Information and innovative technologies in education in modern conditions”, 20 – 23 червня 2023, Варна, Болгарія. С. 391 – 396. URL: <https://isg-konf.com/uk/information-and-innovative-technologies-in-education-in-modern-conditions/>.

499. Кучук Н. Г., Шишацький А. В., Нечипорук В. В., Шапошнікова О. П., Кашкевич С. О. “Розробка методу оцінки захищеності складних технічних систем з використанням штучних імунних систем”. XXVIII Міжнародна науково-практична конференція “Science and development of methods for solving modern problems”, 18 – 21 липня 2023, Мельбурн, Австралія. С. 202 – 209. URL: <https://isg-konf.com/uk/science-and-development-of-methods-for-solving-modern-problems/>.
500. Вітрук Ю. В., Тупота Є. В., Кашкевич С. О. “Аналіз методів багатошляхової маршрутизації в програмно-конфігурованих телекомунікаційних мережах”. V Міжнародна науково-практична інтернет-конференція “Integration of education, science and business in modern environment: summer debates”, 3 – 4 серпня 2023, Україна, Дніпро. С. 254 – 256. URL: <http://www.wayscience.com/wp-content/uploads/2023/08/Conference-Proceedings-3-4-August-2023.pdf>.
501. Кашкевич С. О. “Аналіз моделей дослідження складних технічних систем”. XXXIII Міжнародна науково-практична конференція “Modern scientific technologies and solutions of scientists to create the latest ideas”, 22 – 25 серпня 2023, Лондон, Велика Британія. С. 290 – 294. URL: <https://isg-konf.com/uk/modern-scientific-technologies-and-solutions-of-scientists-to-create-the-latest-ideas/>.
502. Шишацький А. В., Шкнай О. В., Налапко О. Л., Білецька А. В., Кашкевич С. О. “Аналіз підходів до впливу засобами радіоелектронного придушення на мережецентричну систему управління”. XXXIV Міжнародна науково-практична конференція “Science, latest trends, modern problems and improvement of theories”, 29 серпня – 01 вересня, 2023, С. 197 – 206. URL: <https://isg-konf.com/uk/science-latest-trends-modern-problems-and-improvement-of-theories/>.
503. Шишацький А. В., Кашкевич С. О., Тупота Є. В. “Аналіз математичних моделей маршрутизації в бездротових мережах спеціального призначення”. XXXV Міжнародна науково-практична конференція “Modern methods of solving scientific problems of reality”, 05 – 08 вересня 2023, Варна, Болгарія, С. 185 – 193. URL: <https://isg-konf.com/uk/modern-methods-of-solving-scientific-problems-of-reality/>.
504. Кашкевич С. О., Возниця А. С. “The development of methods for finding solutions using the improved of locusts swarm algorithm”. VII Міжнародна науково-практична конференція “Global problems of improving scientific inventions”, 31 жовтня – 03 листопада, 2023, Копенгаген, Данія. С. 271 – 276. URL: <https://isg-konf.com/uk/global-problems-of-improving-scientific-inventions/>.
505. Шишацький А. В., Литвиненко О. І., Жук О. В., Артюх С. Г., Кашкевич С. О. “Розробка методики підвищення оперативності прийняття рішень в організаційно-технічних системах”. XIII Міжнародна науково-практична конференція “Development trends and improvement of old methods”, 12 – 15 грудня 2023, Варшава, Польща. С. 422 – 431. URL: <https://isg-konf.com/uk/development-trends-and-improvement-of-old-methods/>.

506. Шишацький А. В., Плющ Т. М., Кашкевич С. О. “Розробка методу оцінювання складних ієрархічних систем на основі удосконаленого алгоритму рою частинок”. XII Наукова конференція “Наукові підсумки 2023 року”. Збірник тез доповідей. – Харків, Х.: Технологічний центр, 2023. С. 64. URL: <https://entc.com.ua/uk/konferentsii/610-naukovi-pidsumky-roku>.
507. Шишацький А. В., Кашкевич С. О., Тупота Є. В. “Модель взаємодії відкритих систем для безпілотних авіаційних комплексів”. IV Міжнародна науково-практична конференція “Contemporary challenges of society and ways to overcome them”, 30 січня – 02 лютого 2024 р., Таллінн, Естонія. С. 280 – 288. URL: <https://isg-konf.com/uk/contemporary-challenges-of-society-and-ways-to-overcome-them/>.
508. Кашкевич С. О., Дмитрієва О. І., Шкнай О. В., Троцько О. О., Шишацький А. В. Математична модель інформаційного конфлікту інформаційних мереж. XVII International Scientific and Practical Conference. April 30 – May 03, 2024, London, Great Britain. pp. 412–422. URL: <https://isg-konf.com/the-latest-technologies-in-the-development-of-science-business-and-education/>.
509. Wolkoff, P., Azuma, K., & Carrer, P. (2021). Health, work performance, and risk of infection in office-like environments: The role of indoor temperature, air humidity, and ventilation. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 233, 113709. <https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2021.113709>.
510. Adeniyi, O.A., Okikiola, O.L., & Oluwayimika, O.D. (2023). Effects of indoor air quality, humidity and temperature on employees health and performance. *Web of Humanities: Journal of Social Science and Humanitarian Research*, 1(6), 8–18. <https://webofjournals.com/index.php/9/article/view/171>
511. Quraishi, S. A., Berra, L., & Nozari, A. (2020). Indoor temperature and relative humidity in hospitals: workplace considerations during the novel coronavirus pandemic”. *Occupational and Environmental Medicine*, 7, 508–508. <https://doi.org/10.1136/oemed-2020-106653>
512. Wang, C., Zhang, F., Wang, J., Doyle, J.K., Hancock, P.A., Mak, C.M., & Liu, S. (2021). How indoor environmental quality affects occupants’ cognitive functions: A systematic review. *Building and Environment*, 193, 107647. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.107647>.
513. Li, T., Merabtine, A., Lachi, M., & Bennacer, R. (2022). Effects of humidification process on thermal performance of floor heating systems: An experimental study. *Building and Environment*, 221, 109353. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109353>.
514. Byber, K., Radtke, T., Norbäck, D., Hitzke, C., Imo, D., Schwenkglenks, M., Puhan, M.A., Dressela, H., & Mutscha, M. (2021). Humidification of indoor air for preventing or reducing dryness symptoms or upper respiratory infections in educational settings and at the workplace. *Cochrane Database of Systematic Reviews*, 12, CD012219. <https://doi.org/10.1002/14651858.CD012219.pub2>.



515. Klingberg, J., Broberg, M., Strandberg, B., Thorsson, P. & Pleijel, H. (2017). Influence of urban vegetation on air pollution and noise exposure – A case study in Gothenburg, Sweden. *Science of The Total Environment*. 599-600. 1728-1739. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.05.051>.
516. Біляєв, М.М., Русакова, Т.І. & Берлов О.В. (2021). Мінімізація рівня хімічного забруднення атмосферного повітря на відкритій місцевості. Дніпро: Журфонд. 198 с. ISBN 978-966-934-301-7.
517. Про вплив несприятливих умов виробничого мікроклімату на організм людини. <https://te.dsp.gov.ua/fahivets-upravlinnya-derzhpratsi-pro-vplyv-nespruyatlyvyh-umov-vyrobnychogo-mikroklimatu-na-organizm-lyudyny/> (дата звернення: 10.11.2024)
518. Біляєв, М.М., & Русакова, Т.І. (2019). Прогнозування параметрів мікроклімату в робочих зонах методом обчислювального експерименту. *Науковий вісник будівництва*, 95(1), 233–240. ISSN 2311-7257. <https://doi.org/10.29295/2311-7257-2019-95-1-233-240>.
519. Giovanni Giuliani.etal, 1998, "The German Experience in Reference Pricing", *Health Poliey*, Vo1.44, pp73-85.
520. Xu Zhongtang. Brief introduction of urban heating metering and charging technology in Germany and France. *District heating*. 2000,88 (05) : 25-28
521. Sintin. Drawing on the experience of developed countries, the correct formulation of heat pricing policies. *Building energy efficiency*. 2000, 3:14-16
522. Sintin. Current situation and lessons of household heat metering charging in EU countries. *District heating*. 2002,198 (03) : 18-22
523. Tian Yuchen. The development of foreign heat metering and related charging policies. *Heating and cooling*. 2004, 2:34-36
524. Wang Zhenming. History, present situation and development of cogeneration in China. *Thermoelectric technology*. 1992,16 (2) : 1-6
525. Xu Zhongtang. Central heating in developing Chinese cities. *City management*. 2004,4:51-55
526. Li Xianrui. Sustainable development of urban district heating in China. *Hvac*. 2003, 2:6-9.
527. Liu Peiqin, Liu Shumin. Current situation and development of building energy saving in our country. *Gas and heat*. 2002,22 (3) : 255-256.
528. Xu Wei. The development of residential metered heating technology, the consideration of related problems and the comparison of domestic and foreign heating metering and charging technology schemes. *District heating*. 2003, 3:12-15

529. Sintin. Heat price management and pricing policy. District heating. 2002,96 (1) : 16-19
530. Sun Kaiyao. Gas and heat are discussed in residential heating metering. 2001,6:539-541
531. Zhao Shuxing, Wang Rongguang. Discussion on the problems and charging modes of heating metering. Heating and cooling. 2005, 1:24-26
532. Du Jialin, Li Shengying. Energy-saving renovation of existing buildings is the only way to reduce the total energy consumption of heating and air conditioning. Tianjin Construction Technology. 2004, 5:31-32
533. Manufacturing of spur gears having normal teeth on different pressure angles by module disc milling cutter. Sándor Bodzás. International Review of Applied Sciences and Engineering. 2022, Volume 13. Issue 3. 2022. Pages: 321–334. DOI:10.1556/1848.2022.00418.
534. Influence of profile modifications on meshing stiffness, load sharing, and transmission error of involute spur gears. Miryam B. Sánchez, Miguel Pleguezuelos, José I. Pedrero. Mechanism and Machine Theory. Volume 139. September 2019, Pages 506-525. <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2019.05.014>.
535. Hlebanja, G., Erjavec, M., Hriberšek, M., Knez, L., Kulovec, S. (2022). Theory and Applications Based on S-Gear Geometry. In: S. P. Radzevich (ed.), Recent Advances in Gearing. Springer Nature Switzerland AG 2022. page 50-87. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-64638-7\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-030-64638-7_2).
536. Gradual development of S-shaped gears. Hlebanja, Gorazd. MATEC Web of Conferences. Vol. 366. EDP Sciences, 2022. Power Transmissions 2022. <https://doi.org/10.1051/mateconf/202236601001>.
537. Wei Sheng , Zhengminqing Li, Rupeng Zhu Geometry and design of spur gear drive associated with low sliding ratio. Advances in Mechanical Engineering. Volume 13, Issue 4. April 2021. p. 12. <https://doi.org/10.1177/16878140211012547>
538. Tkach P.M. Qualitative indicators of the performance of sinusoidal cylindrical spur gears / P. M. Tkach [and others] // Bulletin of the National Technical University "KhPI": collection of scientific works. Ser.: Problems of mechanical drive. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2017. – No. 25 (1247). – P. 135-139. URI <https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/31858>.
539. Pasternak S. Gear Cutting with Disk-Shaped Milling Cutters / Pasternak S., Danylchenko Y., Storchak M., Okhrimenko O. // S. P. Radzevich, M. Storchak (eds.), Advances in Gear Theory and Gear Cutting Tool Design, pp 233–254. Springer Nature Switzerland AG 2022. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-92262-7\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-030-92262-7_5) .

540. Pasternak S., Danylchenko Yu., Heisel U. Machining strategies for gear cutting with disc shaped milling tools / S. Pasternak, Yu. Danylchenko., U. Heisel U // Bulletin of the National Technical University of Ukraine "KPI". Mechanical Engineering Series No. 2 (74). - 2015. - P. 61 - 66.
541. Hrytsay I. Sine-type gearing transmission as the alternative to the conventional ones and the new method of their production / I.Hrytsay, Y.Lytvyniak, L.Bordyuk, S.Hromnyuk // Zeszyty Naukowe PWZS. - Sanok. - 2014. - P.53-63.
542. Hrytsay I. Sinusoidal Gears and Alternative Method of Tooth Generation // S. P. Radzevich, M. Storchak (eds.), Advances in Gear Theory and Gear Cutting Tool Design, pp 233–254. Springer Nature Switzerland AG 2022. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-92262-7\\_8](https://doi.org/10.1007/978-3-030-92262-7_8).
543. Hrytsay I., Stupnytsky V. Analysis of the Involute and Sinusoidal Gears by the Operating Parameters and a New Method of Its Cutting // Lecture Notes in Mechanical Engineering. – 2020. – Advances in design, simulation and manufacturing II : proceedings of the 2nd International conference on design, simulation, manufacturing: the innovation exchange, DSMIE-2019, June 11–14, 2019, Lutsk, Ukraine. – P. 104–113. DOI:10.1007/978-3-030-22365-6\_11.
544. Lytvyniak Ya.M. Modeling of the formation of helical coaxial generatrix surfaces of the teeth of cylindrical helical gears / Ya.M. Lytvyniak, I.I. Yurchyshyn // Automation of production processes in mechanical engineering and instrument making. - 2018. - Issue 52. - P. 57-71. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Avtomatyzac\\_2018\\_52\\_7](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Avtomatyzac_2018_52_7).
545. Lytvyniak Ya.M. Modeling of the process of continuous forming of teeth with disk cutters with a modified profile in spur gears / Ya.M. Lytvyniak // Bulletin of the National University "Lviv Polytechnic". Dynamics, strength and design of machines and devices. - 2017. - No. 866. - P. 54 - 61. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/VNULPDM\\_2017\\_866\\_10](http://nbuv.gov.ua/UJRN/VNULPDM_2017_866_10).
546. Mesarović M. D. Theory of hierarchical, multilevel, systems. New York : Academic Press, 1970. 294 p.
547. Цымбал Н.Н. Гибкие стратегии расхождения судов / Цымбал Н.Н., Бурмака И.А., Тюпиков Е.Е. – Одесса: КП ОГТ, 2007. – 424 с.
548. Kirkwood J. R. Markov Processes. CRC Press, 2015. 340 p. URL: <https://doi.org/10.1201/b18068>.
549. Astrom K. J. Introduction to Stochastic Control Theory. Dover Publications, 2006. 320 p.
550. Gallager R. G. Stochastic Processes: Theory for Applications. Cambridge University Press, 2014. 553 p.
551. Cheney W. Analysis for Applied Mathematics. New York, NY : Springer New York, 2001. 448 p. URL: <https://doi.org/10.1007/978-1-4757-3559-8>.

552. Ворохобин И.И., Казак Ю.В. Векториальные погрешности, возникающие при повороте судна. Судноводіння. Збірник наукових праць. Одесса: ОНМА. 2015. Вып. 26. С. 60-64.
553. Weintrit A. Marine Navigation and Safety of Sea Transportation. Taylor & Francis Group, 2010. 824 p.
554. Robinson E. L. Data Analysis for Scientists and Engineers. Princeton University Press, 2017. 408 p.
555. Chung K. L. A Course in Probability Theory. 3rd ed. San Diego, CA : Academic Press, 2000. 419 p.
556. Оценка точности координат судна при избыточных измерениях / Д. Астайкин та ін. LAP LAMBERT Academic Publishing, 2017. 284 с.
557. Vorokhobin I. I., Kozak Y. V., Severin V. V. Trajectory error of turn of ship and methods of decline of its size. Science and Education a New Dimension. 2017. Vol. V(14), no. 132. P. 101–104.